

우리나라 산업잠수분야의 사망사고 원인 분석 연구 - 2020~2024

박상원* · 김원석¹ · 윤한삼²

한국폴리텍대학 강릉캠퍼스 산업잠수과, (주)딥네이처 기업부설연구소
¹(사)한국산업잠수협회, 해양기술산업, ²국립부경대학교 학부대학

A Study on the Fatal Accident Cause of Commercial Diving Activity in Korea - 2020~2024

Sang Weon Park* · Won Seok Kim¹ · Han Sam Yoon²

Dept. of Commercial Diving, Korea Polytechnic Gangneung Campus, R&D Center, Deep Nature Co., Ltd.

¹Korea Commercial Diving Association, Ocean Technology Industry

²College of Liberal Arts, Pukyong National University

ABSTRACT

Objectives: Recently, there have been many fatal commercial diving accidents in Korea. This study is the continuation of the study entitled "A Case Study on the Fatal Accidents of the Commercial Diving Activity in Korea"

Methods: We selected 40 cases of commercial diving fatalities from OSHRI research report, court sentencing, press reports and field interview in the period of year 2020 to 2024. we analyzed it according to type of work, diving mode and cause of accident.

Results: Twelve accidents occurred during shellfish diving, nine during propeller debris removal, six during ship husbandry, and thirteen during work related to civil engineering and construction, water reservoir maintenance, agriculture, and others. The predominant equipment used were hookah system (involved in 20 cases), followed by SCUBA equipment (11), full face mask (5), and KMB band mask (2). In two cases the equipment involved remains unknown. The common causes of accidents were varied differential pressure (ΔP) (6 cases), becoming trapped (5), propeller contact (4), equipment malfunction (4), decompression sickness (3), manipulation error (3), wet explosion (1), SCUBA cylinder explosion (1), and air contamination (1). In twelve cases, the cause was unidentified.

Conclusions: To decrease the recurrence of diving fatalities in Korea, predisposing factors such as incompetent supervision, inadequate equipment, poor training, insufficient coordination or planning, and the emergency rescue readiness should be deeply discussed and sharply redefined.

Key words: commercial diving, fatal diving accident, chain of events analysis, predisposing factor, trigger factor


I. 서 론


산업잠수(commercial diving)란 금전적 보상을 목

적으로 잠수 장비를 착용하고 물에 들어가 압축된 기체로 호흡하며 작업하는 것을 말한다(Hermans, 2016; Park, 2021).

*Corresponding author: Sang Weon Park, Tel: 033-610-6131, E-mail: wetstick@naver.com

Dept. of Commercial Diving, Korea Polytechnic Gangneung Campus, Gangneung, Gangwon State, 25605, Republic of Korea
Received: January 21, 2025, Revised: February 20, 2025, Accepted: May 15, 2025

 Sang Weon Park <http://orcid.org/0000-0001-6946-6990>

 Han Sam Yoon <http://orcid.org/0000-0002-5318-4187>

 Won Seok Kim <https://orcid.org/0009-0001-7926-576X>

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.

섬이나 해안에서 이뤄지는 각종 토목공사, 해상 풍력 등 신재생 에너지 개발, 각종 선박들에 대한 유지보수 등 다양한 분야에서 산업잠수를 필요로 하고 있다 (OSHRI, 2015). 산간 내륙지방의 발전 및 식수를 위한 댐이나 다양한 목적으로 조성된 저수지 또한 산업잠수사의 주요 활동 영역이다.

이처럼 산업잠수는 해양이나 내륙을 포함하고 극한 수중환경이라는 직무 특성을 가지고 있다. 따라서 산업잠수사가 활동하는 대부분의 수중환경은 수심과 장소, 작업의 종류를 불문하고 감압병 등 신체 상해 및 생명을 위협하는 치명적인 사고가 발생할 가능성이 현존하고 있다(HSE, 2009; Kulkarni, 2021a; Lee et al., 2022).

최근 급성장 중인 해상풍력발전 산업을 제외하면 해상 석유 및 천연가스(oil & gas) 산업이 거의 전무한 우리나라의 산업잠수는 공기(air) 잠수에 국한된 장비와 기술, 규칙 정비 및 준수 측면에서 미국이나 유럽 등 석유산업이나 신재생 에너지 산업이 발달한 나라와 비교하여 매우 낙후되어 있다(Woo et al., 2015).

현재 국내에서 활동하는 산업잠수사 현황은 2015년 기준 상시근로자와 프리랜서를 모두 포함하여 대략 1,100~1,400여 명으로 추정하고 있다(OSHRI, 2015). 그러나 전문 잠수자격이 없는 경우에도 수중촬영이나 조사 등 다양한 형태로 수중작업에 참여하고 있어 실제 활동 중인 정확한 잠수사의 숫자를 파악하는데 어려움이 있다(Park, 2021).

Park & Yoon(2020)에 따르면 지난 2010년부터 2019년까지 우리나라 산업잠수분야에서 최소 60건 이상의 잠수관련 사망사고가 발생, 매년 평균 5~6명이 사망하였으며 작업 특성에 맞지 않는 장비시스템, 제한된 인원 투입, 규칙 위반, 구조지연 등 사고유형이 매우 후진적이고 대부분은 예방이 가능한 사고라고 주장한 바 있다.

본 연구는 Park & Yoon(2020)의 후속연구로서 2020년부터 2024년까지 최근 5년간 우리나라 산업잠수 현장에서 발생한 잠수관련 사망사고 사례를 조사하고 지속적으로 발생하는 사망사고의 주요 원인을 분석하여 개선된 작업환경 구축을 위한 장비개선, 교육 및 규칙 정비 등에 필요한 기초자료를 제시하고자 한다.

II. 조사 및 방법

본 연구는 2020년부터 2024년까지 국내 산업잠수 현장에서 발생한 잠수관련 사망사고 사례를 조사하였다.

Table 1. The informant of diving fatalities

Mass media	11
OSHRI report	11
Court sentencing	8
KMST sentencing	4
OSHRI OPS*	5
Other	1
Total sum	40

※ OSHRI: Occupational Safety & Health Research Institute, KMST: Korean Maritime Safety Tribunal, OPS*: One Point Sheet

Table 1에서와 같이 신문 및 방송의 언론보도, 법원의 판결문, 해양안전심판원의 판결문, 산업안전보건연구원의 연구보고서 및 사망사고 속보 등 모두 40건의 사망사고 사례를 특정하여 분석하였다. 따라서 극히 일부 사례를 제외하면 본 연구 기간 동안 국내 산업잠수 분야에서 발생한 대부분의 사망사고에 대해 조사 분석이 가능하였다.

수집된 사망사고 사례 중에서 호흡장비를 사용하지 않고 겨울철 저수지 수문 보수 중 얼음 밑에 갇히는 사고로 사망한 사건, 맨몸으로 프로펠러 폐그물 제거 작업 중 사망한 사건, 국적선박의 해외 조업 중 발생한 사건, 해외현장에서 감압병으로 사망한 사건, 아직 판결문 열람이 안 되는 어업 잠수 중 사망한 사건 등은 조사 분석에서 제외하였다.

수집된 사망사고 사례를 수집원별로 분류하면 다음과 같고 조사 내용의 제약사항 및 한계도 같이 제시하였다.

1) 언론보도(신문 및 방송)

신문기사 및 방송뉴스 등 언론보도 내용을 분석하여 사고 날짜 및 잠수영역, 사용 장비, 사망원인 등 잠수관련 사망사고로 보도된 11건을 인용하였다. 다만 잠수관련 사망사고에 대한 언론 보도는 사고 날짜와 장소, 사고 경위 등 사고 초기 정보는 제공하지만 부검결과 등 추가 정보를 제공하지 않는 한계가 있다.

2) 연구보고서

산업안전보건연구원의 연구보고서 '잠수작업 사고사망 원인분석과 안전방안 마련'에서 2003년부터 2022년까지 모두 61건의 사례 중 2020년부터 2022년 4월까지의 본 연구와 관련된 11건의 사례를 인용하였다 (Kang, 2022).

Table 2. The comparison of diving fatalities between studies

	Year	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	Total	
Death	OSHRI report	2	3	4	7	1	1	3	4	2	3	2	7	1	5	2	2	0	3	6*	3**				61
	Previous study								6	6	4	4	13	5	9	3	7	3							60
	Present study																		6	10	10	4	10		40
	Toll difference									2	4	1	2	6	4	4	1	5	3	3	5				40
Shellfish/propeller debris									1	3	4	2	3	4	5	1	6	3	4	6	8	1	2	53	
Shipping/civil & const.									5	3	0	2	10	1	4	2	1	0	2	4	2	3	8	47	

*One breath hold diving included, **until April, 2022

산업안전보건공단 연구보고서는 관할권이 없는 사고에 대해서는 조사할 권한이 없어 본 연구 기간 동안 발생한 실제 사망사고 사례를 모두 포함하지 못하는 한계가 있다. 또한 연구 보고서는 2022년 4월 이후에 발생한 7건, 2023년 4건, 2024년 10건의 사고에 대해서는 더 이상의 정보를 제공하지 않고 있다.

3) 판결문

2020년부터 2024년까지 법원 판결문 8건과 해양안전심판원 판결문 4건을 인용하였다.

여기서 법원의 판결문은 잠수기어업과 프로펠러 장애물 잠수는 물론 선박잠수와 일반 토목/건설잠수에서 발생한 사망사고 중 법률적 처벌의 대상이 되는 사례를 확인할 수 있었다. 해양안전심판원의 판결문은 잠수기어업과 선박 프로펠러 장애물 잠수 중 발생한 사고에 대해 사고 원인 등 구체적 정보를 제공하고 있으나 잠수기어업과 프로펠러 장애물 잠수 사례에 관할이 한정되었다.

4) 기타

산업안전보건공단 사망사고 속보 5건과 언론에 보도되지 않은 1건에 대해서는 관계자 인터뷰 등을 통해 사실관계를 확인·보충하였다.

산업안전보건공단의 재해 속보는 사고 날짜와 대략적인 작업 내용을 알 수 있는 정보는 제공하지만 사용된 장비나 사고 경위를 파악할 수 있는 구체적인 정보를 제공하지 않는 한계가 있었다. 또한 전술한 법원이나 해양심판원의 판결문은 사고 발생 후 일정기간이 지나 판결이 난 후에 열람이 가능하기 때문에 일부 진행 중인 사례는 언론에 보도된 내용과 관계자 인터뷰를 통해 사실관계를 보충하였음을 밝혀둔다.

III. 결 과

1. 최근 15년간 국내 산업잠수 사망사고

본 연구는 2020년부터 2024년까지 최근 5년간 국내 산업잠수분야에서 발생한 잠수관련 사망사고 사례를 조

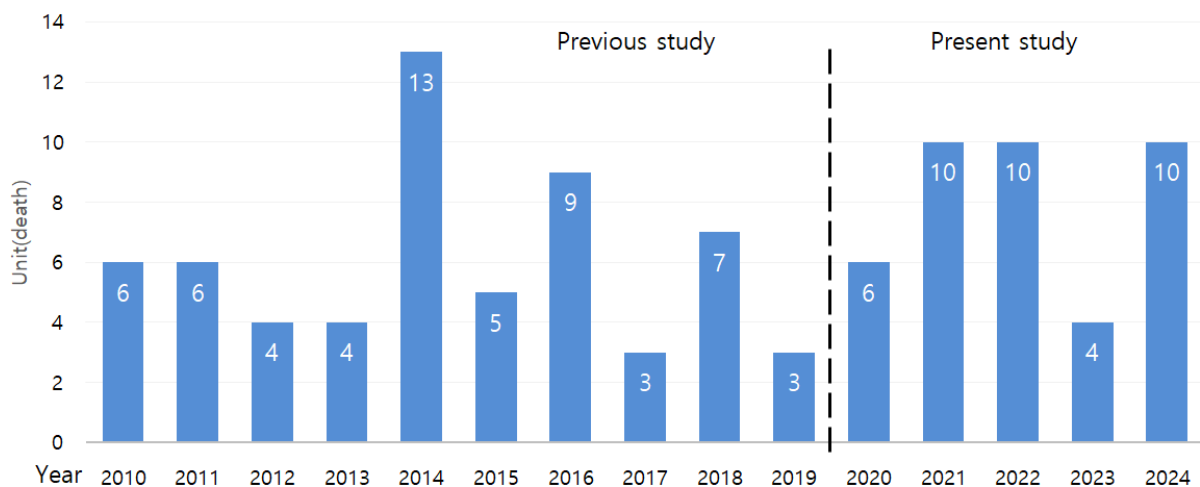


Figure 1. The commercial diving fatalities in Korea in the period of year 2010~2024

사하였다. 그 결과를 사고 날짜, 잠수영역, 사용 장비, 사고 당시의 작업내용과 사망원인 등 잠수관련 사망사고로 특정된 사례를 Figure 1과 같이 나타내었다. 본 연구와 아울러 기존 Park & Yoon(2020)의 연구 결과와 최근 5년간의 연도별 사망사고 발생 현황을 살펴보면 2010년부터 2024년까지 모두 100건의 사망사고가 발생하였음을 알 수 있다.

Figure 1에서 최근 5년간(2020년~2024년) 모두 40건의 사망사고가 발생하였으며 각각 2020년 6건, 2021년 10건, 2022년 10건, 2023년 4건, 2024년 10건이었다.

참고로 Kang(2022)의 연구보고서에 따르면 2003년부터 2022년 4월까지 발생한 사망사고 중 조사가 시행된 사건은 모두 61건으로 본 연구와 조사 기간이 겹치는 사례는 2020년 3건, 2021년 6건, 2022년 4월까지 3건에 해당하였다.

Table 2는 앞서 수집된 자료를 바탕으로 2003년부터 2024년까지의 잠수관련 사망사고의 현황을 보여주고 있는데 본 연구와 지난 연구의 조사 결과에서 직접 비교가 가능한 2010년부터 2021년까지 12년간 정부기관 사망사고 조사건수는 36건이었다. 본 연구의 조사건수 76건과는 40여건의 차이를 보이고 있는데 이는 보다 적극적인 사고조사와 정확한 국가적 통계 작성이 필요하다는 점을 잘 보여주고 있다고 생각된다.

표에서 2010년부터 2024년까지(15년간) 어업 잠수와 프로펠러 장애물 잠수에서 53건의 사망사고가 발생하였고 전문 산업잠수사들의 활동 영역인 선박 및 토목/건설 잠수에서 47건의 사망사고가 발생하였음을 알 수 있다.

2. 잠수 영역별 사망사고 사례

기존 Park & Yoon(2020)은 어업 잠수와 프로펠러 장애물 제거 작업 중 사망사고가 많이 발생하는 국내 산업잠수의 환경적 특성을 고려하여 우리나라 산업잠수 영역을 Figure 2에서와 같이 어업 잠수(shellfishing), 프로펠러 장애물 잠수(propeller debris), 선박 잠수(shipping), 기타 토목/건설 잠수(civil/construction)로 분류하였다. 본 연구에서도 이와 동일한 영역으로 조사 결과를 분류하였다.

2020년부터 2024년까지 최근 5년간 국내 산업잠수 분야에서 발생한 잠수관련 사망사고 사례 40건 모두에 대해 잠수영역별 분류가 가능하였으며 가장 많은 사망

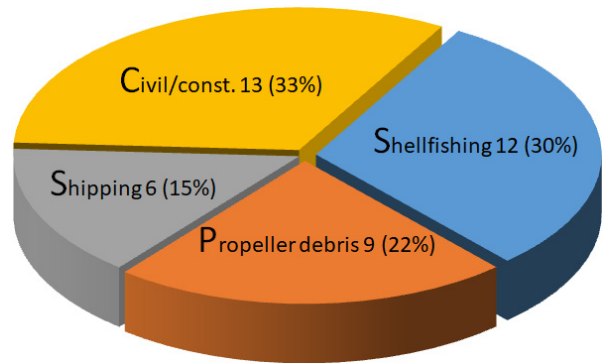


Figure 2. The diving fatalities according to the diving sector

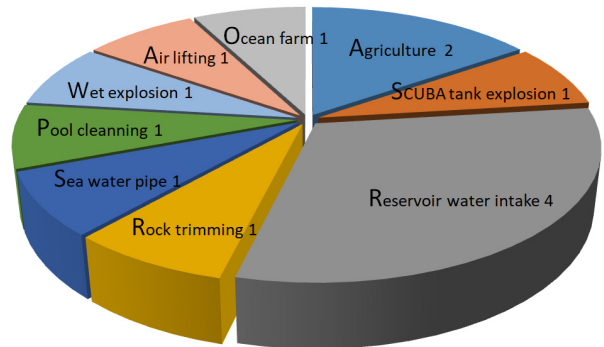


Figure 3. The diving fatalities in civil/const. section

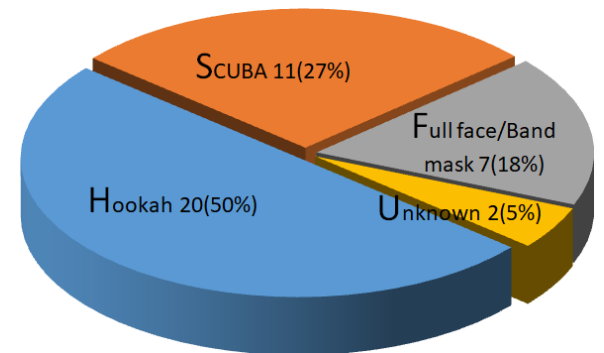


Figure 4. The diving fatalities according to the diving mode

사고가 발생한 단일 영역은 조개채취 등 어업 잠수에 해당하며 모두 12건의 사망사고가 발생하였다. 여기에는 SCUBA 잠수로 해산물을 채취하던 중 발생한 2건의 사망사고를 포함하였다.

한편 해양수산부 자료 ‘근해어업 시·도별 허가 건수’에 따르면 국내 잠수기어업으로 허가받은 선박 척수는 2023년 기준 233척으로 잠수기어업에서 발생한 사망사고는 모두 10건이 조사되어 매년 평균 2건 이상의 사망사고가 발생하는 것으로 조사되었다(MoF, 2024).

그리고 조업 또는 항해 중인 선박의 프로펠러에 걸린

로프 등의 장애물 제거 잠수 중 발생한 사망사고는 모두 9건으로 조사되었다. 이처럼 연안에서 페그물 및 로프 등 폐어구가 선박 프로펠러에 감겨서 발생하는 사고가 빈번히 일어나고 있는데 이러한 사고는 동력 상실로 인한 운항 지연 및 표류로 인한 1차 사고와 더불어서 이를 제거하기 위한 잠수 작업 등으로 인한 2차 사고가 발생하고 있다(Lee et al., 2019).

선박에 대한 정기적인 검사나 해양 이물질 제거 작업 중 모두 6건의 사망사고가 발생하였다. 그중 1건은 7톤 규모의 소형 요트에서 발생하였다.

마지막으로 토목/건설 등 기타 분야에서 발생한 사망 사고는 모두 13건이 보고되었는데 이를 상세하게 살펴보면 Figure 3과 같다. 그림에서 댐이나 저수지 등의 취수탑에서 압력차(delta-P)로 인한 사망사고가 4건, 수중 사석 고르기(rock trimming)와 굴착(air lifting) 중의 사망사고가 각 1건이었다. 해양조사 잠수 중 2건의 사망사고가 발생하였으며 이 중 1건은 감압병으로 치료를 받던 중 챔버 안에서 발생한 심정지로 사망하였다. 그 밖에 양식장 및 해양취수관 작업 중 1건, 고압산소를 이용한 절단 작업 중 수중폭발로 1건, 수심 1.8m의 야외 풀장 청소 중 사망 사건이 1건이었다. 그 밖에 해상풍력 건설 현장에 투입하기 위해 충전 중이던 공기통이 폭발하여 사망한 사례 1건이 있어 보고된 바 있다. 한편 잠수 영역에 따른 연도별 사고 건수는 Figure 8에 나타내었다.

3. 잠수 장비별 사망사고 사례

본 연구의 최근 5년간 국내 산업잠수분야에서 발생한 잠수관련 40건의 사망사고 사례 중 38건에 대해서 사고 당시 사용된 장비에 대한 정보를 확인할 수 있었다. 그 결과는 Figure 4에서 살펴보듯이 사고 당시 사용된 장비로는 hookah가 20건(50%)으로 가장 많았으며 SCUBA가 11건(27%), 그리고 7건(18%)은 지상과 잠수사간 음성 통신이 가능한 full face mask와 KMB band mask를 사용한 경우로서 각 5건과 2건이었다.

나머지 2건(5%)에 대해서는 사고 당시 사용된 장비에 대한 정보가 부족하였는데 1건은 프로펠러 장애물 제거 잠수에서, 다른 1건은 바다 양식장 설비 유지보수 관련 작업에 해당하였다.

Figure 5는 hookah를 사용한 20건에 대한 잠수영역별 사고건수를 나타낸 것으로 어업 잠수 10건(50%), 프로펠러 장애물 잠수 6건(30%), 선박 잠수 3건(15%),

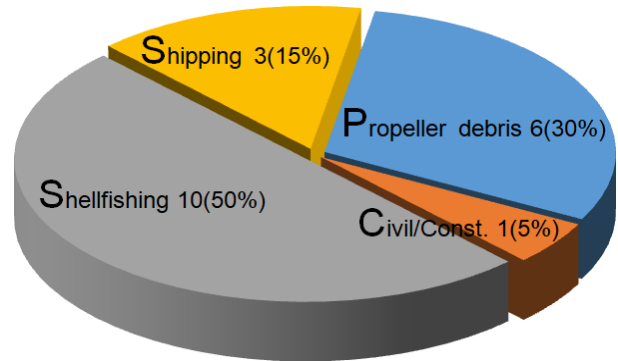


Figure 5. The diving fatalities with hookah used

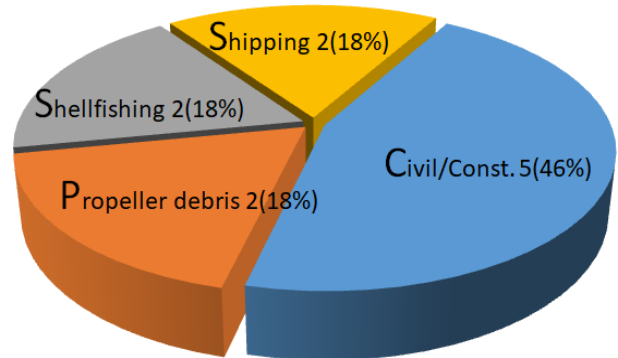


Figure 6. The diving fatalities with SCUBA used

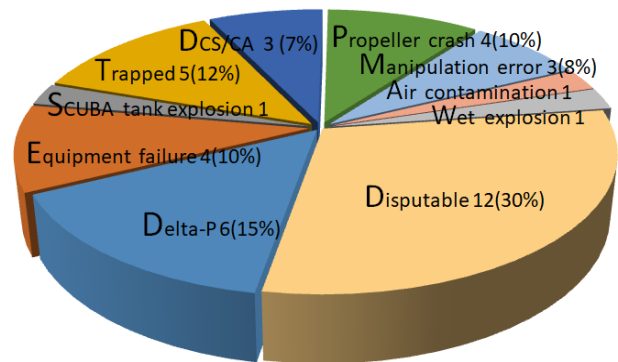


Figure 7. The major cause of diving fatalities

토목/건설 잠수에서 1건(5%)에 해당하였다.

또한 Figure 6은 SCUBA를 사용한 11건의 사고에 대한 잠수영역을 나타낸 것으로 토목/건설에서 가장 많은 5건(46%)이 발생하였는데 충전 중이던 공기통 폭발 사고 1건, 야외 풀장 청소 중 1건, 해양조사 잠수 중 2건, 취수탑 촬영 중 1건이 이에 해당하였다. 그 밖에 프로펠러 장애물 잠수 2건(18%), 어업 잠수 2건(18%), 선박잠수에서 2건(18%)의 사망사고가 발생하였다. 특히 어업 잠수에서 SCUBA를 사용한 2건의 사고는 모두 허

가 없이 수산물 채취 중에 발생하였으며, 선박 잠수로 분류된 2건 중 1건은 대형 선박에서, 1건은 레저용 요트에서 모두 단독 잠수 중 발생하였다.

한편, 통신이 가능한 KMB band mask와 full face mask에 대한 7건의 사고 중 선박 잠수에서의 full face mask 사고 1건을 제외하면 나머지는 모두 취수탑과 사석 고르기 등 토목/건설 잠수에서 발생하였다. 잠수 장비에 따른 연도별 사고 건수는 Figure 9에 나타내었다.

4. 사고 원인별 사망사고 사례

본 연구의 최근 5년간 국내 산업잠수분야에서 발생한 40건의 잠수관련 사망사고 사례 중 28건(70%)에 대한 사고 원인별 발생건수를 분류한 결과를 Figure 7에 제시하였다. 분류할 수 없는 사례는 나머지 12건(30%)이었다.

1) DCS/CA

직접적인 감압병(DCS: decompression sickness) 및 심정지(CA: cardiac arrest)로 사망한 사례는 모두 3건(7%)이었다. 어업 잠수에서의 2건은 폐 감압병(pulmonary DCS)과 동맥기체색전증(AGE: arterial gas embolism)이 사망 원인이었다. 여기서 감압병은 주로 깊은 수심에서 급상승하거나 장시간에 걸친 여러 번의 잠수에서 충분히 감압을 하지 못할 경우 발생하는 데 이는 선박 1척당 잠수사 1인 조업 원칙의 근무형태나 깃가림제(보험제) 등 열악한 잠수기어업 실태를 주요 원인으로 지목할 수 있다(Heo et al., 2015; Cha et al., 2019). 나머지 1건은 전 날 무리한 잠수에 따른 감압병을 치료하던 중 챔버에서 심정지가 발생하자 급하게 챔버 압력을 해제하고 심정지를 치료하는 과정에서 잠수사가 사망한 경우이다. 챔버에 함께 들어갔던 간호사(inside tender)도 급상승 과정에서 심각한 폐 부상을 당해 치료를 받아야 했다.

현재 미해군 잠수 매뉴얼에 따르면 심정지가 발생한 경우 감압병에 우선하여 처치하도록 규정하고 있다(US Navy, 2018). 미해군 잠수 매뉴얼은 표면 감압 잠수 중 발생한 공기색전증 등 감압병에 대해 응급처치 절차를 자세하게 규정하고 있는데, 도서지역이나 먼 바다 등에서의 응급조치가 필요한 경우 전문 의료인의 원격지원이 가능하도록 하는 제도적 논의가 필요해 보인다(Kim, 2024).

2) Delta P

수중 압력차에 의한 빨려들(delta P) 사고는 모두 6건(15%)이었다.

이 중 4건은 저수지 취수탑 안전진단 및 유지보수 작업 중 열려있는 취수구에 빨려 들어가 사망한 경우로서 1건은 SCUBA를, 나머지 3건은 통신이 가능한 full face mask 1건, KMB band mask 2건을 사용한 경우이다. 4건 모두 동료 잠수사에 의해 사고발생 시점이 확인돼 즉시 구조요청을 하였으나 취수문 개·폐장치가 고장나는 등의 이유로 압력차를 해결하지 못하고 끝내 잠수사가 사망하였다. 이 중 1건은 동료잠수사가 재해자를 구조하던 중 함께 사고를 당하였다.

또한 1건은 그레이팅(grating)을 개방하고 씨 체스트(sea chest) 안쪽에 부착된 해양 이물질 제거하던 중 갑자기 취수모터가 작동하여 해수흡입관 안으로 재해자가 빨려 들어가 사망하였다. 나머지 1건은 SCUBA 잠수로 수산물을 채취하던 중 발전소 냉각 취수관로에 빨려 들어가 사망한 경우이다. 해상에는 선박접근금지 안내 부표가 설치되어 있었으나 재해자가 수중으로 이동하는 과정에서 가동 중이던 취수관로에 접근한 것으로 추정된다.

3) 프로펠러 충격

프로펠러 충격(propeller crash)으로 사망한 사례는 모두 4건(10%)에 해당하였다.

이 중 1건은 해저 취수관 인양 작업 중 수면에 늘어져 있던 공기호스가 근처를 향해 중이던 예인선(tug boat)의 프로펠러에 빨려 들어가 감기면서 추진기가 잠수사를 충격하여 사망케 하였다. 다른 1건은 어선에서 프로펠러 장애물 제거 작업 중 얼굴에 상처(상하 턱뼈 골절)를 입고 작업자가 사망하였는데 높은 파도 때문에 충격을 받고 통제를 상실하여 사망한 것으로 추정하고 있다.

또한 SCUBA로 프로펠러 장애물 제거 중 발생한 2건 중 1건은 선주의 지시를 받고 감시인 없이 단독으로 작업을 시작하였으나 이 사실을 알지 못한 선장이 프로펠러를 가동하면서 프로펠러 충격으로 사망하였고 나머지 1건은 60대 모터보트(18톤) 선장이 악기상 속에서 작업을 하다가 프로펠러에 머리를 다쳐 실종 후 사망한 채 발견되었다.

4) 감김 및 갇힘

감김 및 갇힘 사고로 인한 사망사고는 5건(12%)에

해당하였다.

먼저 공기호스가 프로펠러에 감겨 절단되자 공기 공급이 중단돼 사망한 경우가 2건이었다. 2건 모두 평소 보다 길게 투하된 공기호스가 배를 회전시키거나 후진하는 과정에서 추진기에 감기면서 발생하였다. 공기가 차단되자 잠수사가 낚 벨트를 풀고 탈출을 시도한 것으로 추정되나 모두 사망하였다.

다른 1건은 full face mask를 착용하고 선박 쓰러스트 터널(thruster tunnel)에 진입하여 해양 이물질 제거 작업 중 호스에 이상이 생겨 공기 공급이 중단되자 휴대하고 있던 비상기체로 호흡기를 교체하고 탈출하려 하였으나 마스크 역 빨림(vacuum up) 현상으로 실패하고 사망한 것으로 추정하고 있다. 또 다른 1건은 full face mask로 취수탑 내진 공사 중 수심 27m 지점에서 토사 굴착 작업 중 풍화암으로 추정되는 암석에 깔려 잠수사가 사망한 사례이다. 마지막으로 프로펠러 장애물 제거 중 여분의 hookah 호스에 작업자의 목과 다리가 감겨 경부압박성 질식에 따른 사망이 1건이었다.

5) 장비 오류

장비고장으로 인한 사망사고 사례는 4건(10%)으로 hookah를 사용하는 잠수기어업과 프로펠러 장애물 잠수 중 발생하였다.

보통 공기압축기에서 압축된 공기는 배관을 통해 공기저장용 압력탱크에 저장되었다가 호스를 통해 잠수사에게 공급된다. 그중 1건은 배관의 평판 플랜지 사이의 개스킷이 손상돼 다량의 공기가 유출되면서 잠수사가 충분한 공기를 공급받지 못하자 수면(수심 23m)으로

긴급 부상하였으나 공기색전증(AGE)으로 사망한 경우이다. 다른 1건은 규모가 작은 소형 선박에서 공기압축기에 동력을 전달하던 구동축의 클러치가 풀리면서 공기가 공급되지 않자 잠수사가 낚 벨트를 풀고 수면 상승(수심 23m)을 시도하였으나 사망하였다. 또 다른 1건은 잠수사를 보조하는 '줄잡이' 선원이 자리를 비우고 수산물 선별작업을 하는 동안 공기압축기에 연결된 공기호스(길이 45m)의 중간 연결부위가 분리되면서 공기공급이 중단돼 작업 중(수심 26m) 사망한 경우에 해당하였다.

마지막으로 프로펠러 장애물 잠수 중 필요한 압력보다 낮은 압력(5kgf/cm²)의 공기로 호흡하다 작업 중 의식을 잃고 작업자가 사망한 경우이다.

6) 착용 오류

장비착용 오류로 인한 사망사고는 3건(8%)에 해당하였다.

먼저 1건은 SCUBA 장비로 선착장에 정박 중인 레저용 요트(7톤 규모)의 선체 청소를 시도 하던 중 장비가 몸에 맞지 않자 이를 수정하기 위해 출수하는 과정에서 탱크가 결합된 부력조절기(BCD)를 먼저 벗는 바람에 12kg 상당의 낚 벨트의 무게를 이기지 못하고 7m 바닥으로 추락(free fall)하여 사망한 경우이다.

다른 하나는 레저시설의 안전요원이 SCUBA를 이용하여 야외 파도풀장(수심 1.8m)의 바닥 청소를 마치고 수면으로 부상하여 출수를 위해 이동하던 중 원인 모를 이유로 바닥에 추락하여 사망하였는데, 작업 중 오리발을 착용하지 않은 점, 수면으로 부상할 당시 부력조절

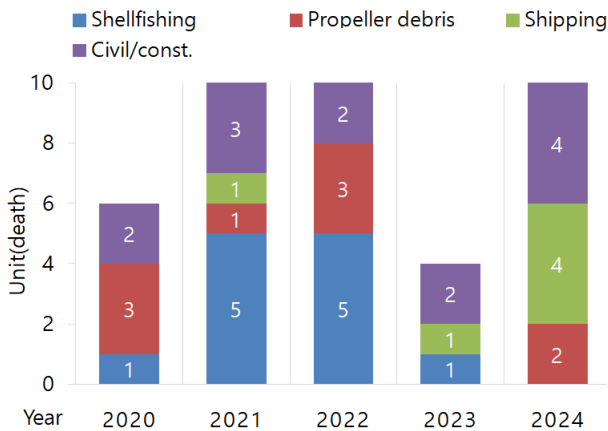


Figure 8. The yearly fatalities by diving section

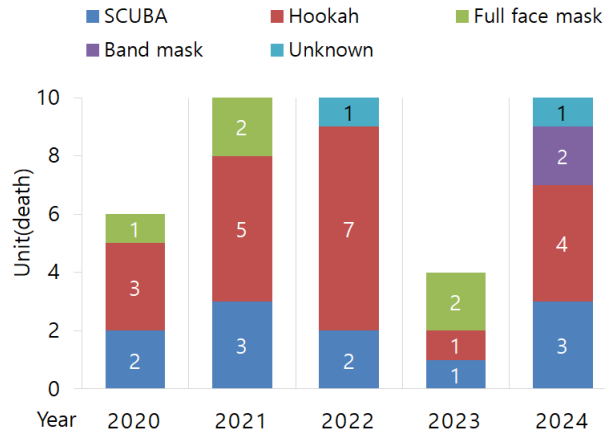


Figure 9. The yearly fatalities by diving mode

기(BCD)에 공기를 주입하지 않았던 점, 구조 당시 낱벨트를 착용하고 있었던 점 등을 미루어 장비 착용오류를 하나의 사고 원인으로 추정하고 있다.

또 다른 하나는 조개채취 작업을 마치고 앞선 잠수의 부족한 감압시간을 보충하고자 추가감압을 목적으로 입수하였으나 잠수복의 전면 지퍼가 열린 채 입수하였다가 해수가 유입되자 감압을 건너뛴 채 급상승, 입항 후 치료 중 폐 감압병으로 사망한 경우이다.

7) 수중폭발

수중절단 중 발생한 폭발로 머리 부상에 따른 사망 사고가 1건이었다. 해당 사례는 머리보호에 취약한 full face mask를 착용하였으며 수중폭발의 정확한 원인은 밝혀지지 않았으나 절단 중 또는 기존에 존재 하던 가연성 가스가 다 빠져나가지 못하고 터널 상부를 지탱하는 H형 강 구조물에 갇혀 형성된 가스 포켓(gas pocket)이 아크와 만나 폭발한 것으로 추정하고 있다. 사고가 발생한 현장은 부전~마산 복선전철 낙동강 터널구간으로 붕괴사고 원인에 대한 조사과정에서 지반조사를 위한 시추 중 설계당시와는 다르게 다량의 메탄가스가 측정되었다고 보도된 바 있다(Busan MBC, 2024).

수중폭발의 경우는 충격파에 의한 일차성폭발부상(PBI: primary blast injury)을 동반할 수도 있으나 부검자료가 없어 폐 손상 등의 여부는 알 수 없었다(Na et al., 2014; Lance & Bass, 2015).

수중에서 다량의 산소를 사용하는 산소아크 절단은 물의 전기분해와 열분해로 인해 가연성이 높은 수소(H)가 발생하는데 이때 폭발한계(explosive limit) 범위에 도달하면 폭발한다. 폭발한계는 온도와 압력, 다른 가연성 가스의 존재와 농도에 따라 변하며, 폐 송유관 등 절단 대상물의 종류, 페인트 등 도포제의 종류에 따라 달라질 수 있다(IMCA, 2004; Kulkarni AC, 2021b). 특히 작업장소가 해저인 경우 저질의 상태에 따라 일산화탄소, 메탄가스, 황화수소 등 가연성 가스가 자연 발생하여 구조물에 누적될 가능성이 높아 지는데, 2012년 동일본 대지진으로 인한 피해 복구의 일환으로 해상 강관파일 절단 중 폭발로 발생한 수류 충격(hydraulic ram)에 의해 잠수사가 사망한 사례에서 저질에서 자연 발생한 메탄가스가 폭발의 주요 원인으로 밝혀진 바 있다. (JNIOH, 2016; Hermans, 2018).

8) 공기 오염

공기통 내 일산화탄소 등 공기 오염에 따른 사망사고가 1건이었다.

해당 사례는 해양조사를 위해 SCUBA 공기통을 충전 하던 중 낱때 때문에 환기가 원활하지 못한 실내 조건에서 2대의 공기압축기를 동시에 작동시켜 공기통을 충전하는 과정에서 기준치를 초과하는 일산화탄소 등 불완전 연소물이 충전된 것으로 밝혀졌다. 잠수 중 의식을 잃고 엎드린 자세로 수면에 떠올랐으나 구조지연으로 잠수사가 사망한 경우이다. 당시 착용한 부력조절기는 의식이 없는 상태에서 face-up 자세를 유지하는데 불리했던 것으로 조사되었다.

9) SCUBA 탱크 폭발

공기통 충전 중 탱크 폭발에 따른 사망사고가 1건이었다. 해당 사례에서의 공기통은 각각 1996년과 2003년에 생산된 후 한 번도 검사를 받지 않은 것으로 '고압가스안전관리법 시행규칙 별표 22'에 따르면, 스킨스쿠버 다이빙용 탱크는 신규 검사 후 10년 이하 경과한 용기는 5년마다, 10년을 초과한 것은 3년마다 재검사를 받아야 한다. 또한 탱크 밸브도 2년마다 재검사를 받아야 한다.

10) 판단 보류

구체적인 사고 원인을 판단하기 어려운 사례로는 프로펠러 장애물 잠수 5건, 어업 잠수 3건, 선박 잠수 2건, 토목/건설 잠수 2건 등 모두 12건이었다.

먼저 프로펠러 장애물 잠수 5건 중 4건에 대해서 처벌을 목적으로 작성된 법원 판결문을 살펴보면 잠수자격증 없는 선원이 hookah를 착용하고 감시인 없이 단독으로 작업을 수행하다가 호흡기가 입에서 빠진 채 의식이 없는 상태로 발견된 경우이다. 또한 해산물 채취 작업 중 의식을 상실한 채 선장이나 감시인에 의해 발견된 경우 2건, 선박 해양 이물질 제거 작업 중 의식을 잃고 동료들에 의해 발견된 2건이 여기에 해당한다. 마지막으로 full face mask로 수중 사석 고르기 작업 중 통신을 통해 호흡 신호가 끊어짐을 확인하고 구조를 시도하여 2시간여 후 의식을 잃은 채 구조되었으나 사망한 경우이다. 이상의 9건의 사례는 정확한 의식상실의 원인을 밝히지 못한 상황이다.

나머지 3건에 대해서도 사고 원인을 판단하기에는 정보가 부족하였다.

IV. 고 찰

1. 잠수 사망사고의 원인 분석

일반적으로 사고 발생의 원인을 분석하기 위해 적용하는 RCA(root cause analysis) 분석은 SCUBA 사고와 같이 목격자 등 사고 원인을 파악하기 곤란하기 때문에 기인하는 촉발 요인(trigger), 불능 요인(disabling agent), 불능 상해(disabling injury), 사인(cause of death)의 단계로 합리적인 추정에 근거하여 인과관계를 순차적으로 분석(sequential analysis)하는 방식을 많이 활용한다(Denoble, 2008; Kim, 2014).

예를 들어 SCUBA 잠수로 취수관로 근처에서 수산물 채취 중 취수관로에 빨려 들어가 사망한 경우 사고 촉발 요인은 취수관로 주위의 해수 유동에 의한 빨려들(delta-P), 불능 요인은 상승 실패(trapped), 불능 상해는 공기 고갈에 의한 질식(asphyxia), 사인은 익수에 따른 익사(drowning)이다.

최근에는 CEA(chain of events analysis)에 사고 선행 요인(predisposing factor)을 추가하여 사고 원인을 분석하는데 활용하고 있다. 사고 선행 요인은 잠수 시작 전 사고 체인에 영향을 미칠 것으로 예상되는 선행 위험요소로 건강 상태(health), 조직(organization)·훈련(training)·기술(skills)·경험(experience), 협력(coordination), 관리·감독(supervision), 계획(planning), 활동(activity), 장비(equipment), 기타(other/unknown) 등으로 구성된다(Lippmann et al., 2017).

예를 들어 수산물 채취 작업 중 부족한 추가감압을 위해 잠수했다가 열린 지퍼로 물이 들어오자 감압을 생략한 채 급상승하여 폐 감압병으로 사망한 사례에서 사고 선행 요인은 앞선 잠수의 부족한 감압에 따른 감압병에 취약한 질소가 풍부한 신체 상태(health)이며, 사고 촉발 요인은 열린 지퍼 때문에 발생한 침수, 불능 요인은 감압을 생략한 급상승, 불능 상해는 폐 감압병, 사인은 DCS이다.

따라서 전술한 사망사고 발생의 주된 선행요인은 Figure 10의 조사결과를 적용하면 줄잡이 선원의 부주의로 인한 공기호스의 프로펠러 감김, 감시 부재 및 소홀로 재해자의 뒤늦은 발견, 높은 안벽이나 선박에서의 구조방안 부재, 압력 검사를 받지 않은 탱크의 충전 중 폭발 및 충전 중 공기오염 등의 관리·감독 부실 12건, 취수탑 및 씨 체스트 작업 중 LOTO(lock out, tag out, try out)등 빨려들(delta-P) 사고에 대한 안전

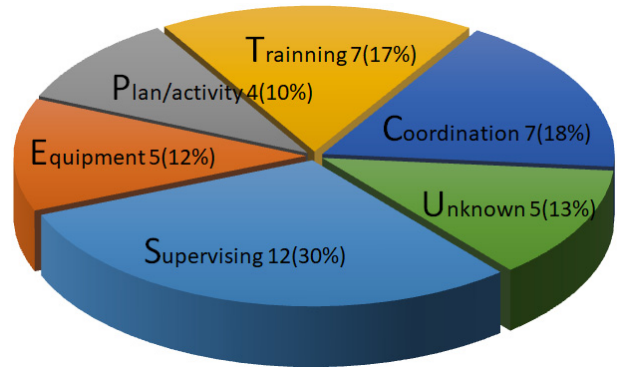


Figure 10. The predisposing factors of diving fatalities

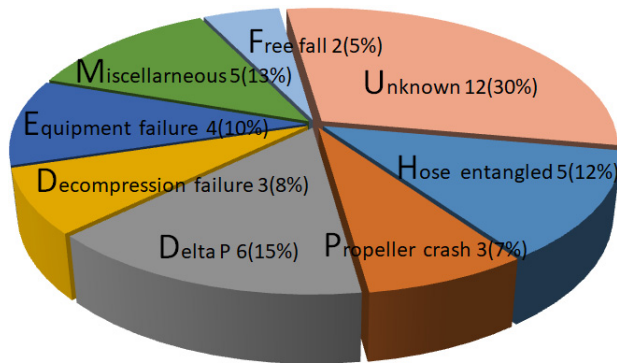


Figure 11. The trigger factors of diving fatalities

조치 및 협력 부재 6건, 선원에 의한 프로펠러 장애물 제거 작업 등 무자격·훈련부족 7건, 체크밸브 없는 마스크 사용, 클러치 작동식의 공기압축기나 연결식 호스 등 잘못된 장비 사용이 5건이었다, 부적합한 활동·계획은 4건으로 발전소 취수관로 근처에서의 잠수와 불법어로 등 2건, 수중 절단 중 환기 부족, 토사 굴착 중 설계 오류 등 기타 2건이었다. 선행 요인을 판단할 수 없는 경우는 모두 5건이었다.

그리고 사망사고에 직접적인 영향을 미친 사고 촉발 요인은 Figure 11의 조사결과를 적용하면 호스 감김 사고는 모두 5건으로 공기호스 파손 2건, 경부압박 1건, 호스 감김에 따른 프로펠러 충격 1건, 쓰러스트 터널 갇힘 1건이었다. 장비고장에 따른 공기 차단 4건, 불충분한 감압에 따른 DCS 3건, 압력차에 의한 빨려들(delta P) 6건, 프로펠러 충격에 따른 상해 3건, 출수 및 장비해체 중 추락 2건, 그리고 수중폭발 및 충전 중 탱크 폭발, 일산화탄소 중독, 토사에 의한 매몰, 드라이 슈트 침수가 각 1건이었다. 나머지 12건에 대해서는 위속 내용물에 의한 질식 1건을 제외하면 의식상실의 이유 등 정확한 사고 촉발 요인을 밝히지 못하고 있는데

이는 잠수관련 사망사고의 대부분은 수중 사고 상황에 대한 적절한 목격 정보를 확보하기 어렵기 때문으로 판단된다(Kim, 2014).

2. 잠수 장비, 팀원, 구조 지연

1) 잠수 장비

일반적으로 hookah는 특별한 교육이나 자격증 없이 누구나 사용이 가능하기 때문에 사고 비중이 가장 높은 장비 중의 하나이다. 그러나 사고 발생 시 위험을 알릴 마땅한 통신수단이 없어 사고인지가 늦어 대부분 재해자를 미연에 구조하지 못하는 치명적인 단점을 가지고 있다.

전술한 잠수 장비 불량으로 인한 사망사고 발생에 대비하기 위한 국제기준을 요약하면 다음과 같다.

미국직업안전보건청(Occupational Safety & Health Administration, OSHA)은 표면공급식 잠수 장비는 반드시 육상과 잠수사 사이에 양방향 음성 통신이 가능해야 한다고 규정하고 있다. 따라서 hookah는 양방향 통신이 안 되는 이유로 표면공급식 잠수 장비에서 제외하고 있다(OSHA, 2011). 미국의 경우 hookah 사용으로 발생하는 사고 사례는 매우 제한적이다(Park, 2021; OSHA, 2024).

또한 국제잠수공사협회(Association of Diving Contractors International, ADCI)는 표면공급식 잠수 헬멧과 마스크는 호스가 파손될 경우 수압에 의한 역 빨림(vacuum up) 현상을 방지하기 위해 반드시 체크밸브(check valve)를 사용하도록 규정하고 있다(ADCI, 2016). 이에 반해 국내 체크밸브가 없는 full face mask는 역 빨림(vacuum up) 현상으로 마스크가 얼굴에 압착될 경우 호흡은 물론 half face mask와 SCUBA 2단계 방식의 비상기체를 휴대하더라도 호흡기 교환 등이 불가능하다. 따라서 인라인(in-line) 또는 내부 장착(built-in) 체크밸브와 원터치 방식의 비상기체 전환용 스위치 블록을 사용해야 한다.

그리고 국제해양공사협회(International Marine Contractors Association, IMCA)는 작업 잠수사와 대기 잠수사에게 각각의 독립된 주 공기 공급원을 배정하여 개별적으로 공기를 공급하고 공급중단에 따른 사고에 대비하여 예비 공기 공급원을 추가로 배정하도록 하고 있다(IMCA, 2014). 또한, 호스 파단 등의 이유로 공기 공급이 중단될 경우를 대비하여 비상탈출용 기체(bail out)를 휴대하도록 규정하고 있는데 ADCI는 가

장 깊은 수심을 기준으로 4분을, IMCA는 분당 최소 40 l/min.의 소모량으로 매 10m당 1분을 호흡할 수 있는 여분의 기체를 휴대하도록 하고 있다.

2) 잠수 팀원

‘산업안전보건기준에 관한 규칙’에 따르면 SCUBA는 2인 1조 작업에 감시인 1명을, 표면공급식은 작업자가 1명인 경우 감시인 1명을, 작업자가 2명 이상인 경우 작업자 2명당 감시인 1명을 배치하도록 하고 있으나 두 경우 모두 감시인에 대한 자격 규정을 두고 있지는 않다.

하지만 OSHA는 SCUBA와 표면공급식 잠수의 최소 팀원을 3명으로 규정하면서, 표면공급식 잠수에서 조종반 및 통신 담당 등 감독자(supervisor)나 감시인(tender)이 대기잠수사(standby diver) 역할을 수행해야 할 때는 반드시 자격을 갖춘 것을 요구하고 있다. 자격을 갖추지 못했다면 자격을 갖춘 인력을 추가로 배치해야 한다.

본 연구에서 밝혀진 단독 잠수 사례는 모두 20건으로 그중 감시인 부재나 감시임무 소홀이 추정되는 사례는 모두 12건에 해당하였다.

3) 구조 지연

잠수사고에서의 구조는 재해자를 신속하게 수중에서 수면까지 끌어 올리는 수중구조 과정도 중요하지만 재해자를 선박이나 안벽 위로 출수시켜 구조대에 인계하기까지의 수면구조 과정도 매우 중요하다(Park et al., 2019). 따라서 잠수작업 위험성 평가단계에서 선박이나 안벽의 높이 등을 고려한 적절한 출수 수단을 강구해야 한다. 구조의 위급함 때문에 수중 감압을 생략해야 할 상황이라면 공기색전증(AGE) 등 감압병 발병에 대비한 챔버 등의 추가 수단이 필요하다(Park & Yoon, 2021).

전술한 해양조사 중 오염된 공기로 의식을 잃고 수면에 엎드린 채 발견돼 사망한 사례에서 당시 고령의 선장이 재해자를 조기 발견하였으나 나중에 동료들에 의해 구조될 때까지 적절한 구조조치를 취하지 못한 것도 사망의 한 원인으로 보고 있다.

또한 이종계류 선박에서 해양 이물질 제거 작업 중 사망한 사례에서 당시 동료잠수사가 이동하던 중 의식을 잃고 가라앉는 재해자를 발견하고 구조를 시도하였으나 통신이 안 되는 hookah를 사용 중이었고 감시인의 시야에서 벗어난 상태라 구조 요청이 늦어졌고, 안

벽으로 옮기는데 30여 분이 지체돼 병원 이송 후 다음 날 결국 사망하였다.

이처럼 앞선 사례에서 수압차를 먼저 해결해야 구조가 가능한 빨려들(delta P) 사고를 제외하더라도 구조 지연으로 추정되는 사례는 모두 15건이었다.

따라서 선행요인 단계에서는 잠수 전 위험성 평가를 통해 예방적 개입(preventive intervention)이 필요하고 사고 발생 후에는 신속한 구조(well-timed intervention)를 통해 사고 체인에서 다음 단계로 진입하는 것을 차단할 수 있도록 작업 환경에 맞는 적절한 구조대책이 선행되어야 한다.

3. 국내 산업잠수분야의 당면과제

최근 우리나라 산업 잠수분야에서의 사망사고 저감을 위한 노력은 꾸준히 지속되고 있다.

기존 Park & Yoon(2020)은 '우리나라 산업잠수분야의 사망사고 사례연구'에서 국내에서 발생하는 실질적 사고 건수에 근접한 자료를 제시하면서 우리나라의 잠수관련 사망사고의 후진적 특성을 지적하였고, Kang (2022)은 '잠수작업 사고사망 원인분석과 안전 방안 마련'을 통해 사고 예방을 위한 여러 실무적 대책들을 제시한 바 있다.

통계청 조사에 따르면 최근 우리나라 전체 근로자에 대한 사고 사망만인율은 2014년 이후 0.5~0.4‰대로 꾸준히 감소세를 유지하다가 2023년 처음으로 0.39‰대에 진입하였다. 하지만 전술한 바와 같이 어업 및 선박, 토목/건설 등 국내 잠수관련 상시근로자와 프리랜서를 포함하여 약 1,100~1,400여 명이 산업잠수 현장에서 종사한다고 추정할 경우, 매년 평균 5~6건 이상의 사망사고가 발생하고 있어 타 분야와 비교하여 상대적으로 매우 높은 사망률을 나타내고 있다. 한편 2024년 12월말 유족급여 승인 기준 우리나라 근로자 사고사망자는 827명이다(Statistics Korea, 2024).

또한 산업안전보건기준에 관한 규칙은 산업잠수와 관련하여 필요한 최소인원을 규정하면서 감시인을 배치하도록 하는 등의 법적 기준을 강화하고 있다. 그러나 규칙 위반에 따른 사고가 계속 발생하고 있어 처벌 강화가 실질적인 재해 예방효과에 이르지 못하고 있는 실정이다. 본 연구에서 수집된 판결문을 분석하면 규칙 위반으로 처벌 대상이 된 사례는 모두 16건으로 어업 잠수 7건, 프로펠러 장애물 제거 잠수 6건, 기타 3건이었다.

Jung(2024)은 산업안전보건원리와 법 이론에 충실하

지 않은 규정은 단기적으로는 반짝 효과를 거둘 수 있을지 모르나 중장기적으로는 오히려 재해예방의 역효과를 불러일으킬 수 있다고 지적한 바 있다. 따라서 법적 처벌보다는 생명과 신체 보호에 기초한 안전 및 보건 원리의 본질을 이해하고 안전한 작업환경을 보장하기 위한 실질적인 사고 저감정책을 추진해야 할 필요성이 있다(Oh, 2022).

예를 들면 '수산업법 시행령 제21조 1항 제21호'에는 어선 1척당 1명의 잠수사가 승선하여 조업해야 한다고 규정하고 있는데 만약 시행령에서 교대로 조업하는 것을 허용한다면 교대하는 동안 충분한 감압시간을 제공하고 구조역할을 수행할 수 있어 감압병 및 중대사고 예방에 좋은 대안이 될 수 있다.

한편 2024년 한 해 선저 검사 등 선박 잠수에서 발생한 4건의 사망사고 중 3건은 대형조선소 이중 계류 중인 선박에서 작업 중 발생하였다. 대형 선박에서의 작업은 잠수사의 이동거리가 멀어지고 공기호스가 조류나 선박에 끌리는 마찰 등으로 감시인(tender)이 호스 줄잡이 역할을 제대로 수행하기 어렵다. 필요 이상의 호스 여유분(slack)은 조류나 펜더(fender)에 꼬일 가능성이 높아지고 필요할 경우 줄 신호(line pull signal)를 하거나 위급한 상황에서 탈출용 가이드라인으로 사용하는 것도 어렵게 한다.

또한 SCUBA를 산업 잠수에 사용할 경우에도 대형 선박의 선저(hull bottom)등 수직 상승이 불가능한 곳에서는 사용을 제한해야 하고, 조류나 시야 제한 조건에서는 줄잡이(line tending) 줄신호 또는 음성 등의 적절한 통신 수단을 확보해야 한다.

따라서 SCUBA를 많이 사용하는 국내 산업 잠수 환경을 고려하면 미국이나 호주 등 해외처럼 산업 SCUBA (commercial/occupational SCUBA) 개념을 도입하여 자격 및 교육기준, 안전규칙을 강화하는 것도 좋은 방안이 될 수 있다(OSHA, 2011; ADAS, 2024).

마지막으로 우리나라도 OSHA의 사례처럼 표면공급식 잠수 장비를 양방향 음성 통신이 가능한 장비로 새롭게 정의하고, 감독자(supervisor)나 감시인(tender)의 자격을 규정하여 사고 발생 시 구조 잠수사(standby diver) 역할을 수행할 수 있도록 해야 한다.

V. 요약 및 결론

본 연구는 Park & Yoon(2020)의 후속연구로서

2020년부터 2024년까지(5년간) 최근 우리나라 산업잠수분야에서 발생한 잠수관련 사망사고 사례 40건을 조사하고 사망사고의 주요 원인을 분석하여 개선된 작업환경 구축을 위한 장비개선, 교육 및 규칙 정비 등에 필요한 기초자료를 제시하고자 하였다.

그 결과를 요약 정리하면 다음과 같다.

첫째, 사망사고 사례 40건은 어업 잠수 12건, 프로펠러 장애물 제거 잠수 9건, 선박 잠수 6건, 그 밖의 토목/건설 잠수 13건이었다.

둘째, 사망사고 사례 40건 중 밝혀진 38건에 대한 사고 당시 사용 장비는 hookah가 20건, SCUBA가 11건, full face mask가 5건, KMB band mask가 2건이었다. 이 중 hookah를 사용한 20건의 산업잠수 영역을 살펴보면 어업 잠수 10건, 프로펠러 장애물 제거 잠수 6건, 선박잠수 3건, 토목/건설잠수 1건으로 SCUBA와 함께 가장 많이 사용되는 장비였다.

셋째, 사망사고 사례 40건 중 밝혀진 28건에 대한 사고 원인은 감압병(DCS) 3건, 프로펠러 충격 4건, 감김 및 간힘 5건, 압력차(delta P) 6건, 장비고장 4건, 장비조작 실수 3건, 수중폭발, 공기통 폭발 및 오염된 공기 충전이 각 1건이었다.

넷째, 사망사고 사례 40건 중 밝혀진 35건에 대한 사고 선행요인은 규칙위반 및 관리부실 12건, 훈련부족 7건, 업무협력 부족 7건, 장비부실 5건, 잘못된 계획·활동 4건이었다.

마지막으로, 사망사고 사례 40건 중 밝혀진 28건에 대한 사고 촉발요인은 공기호스 감김 5건, 장비고장 4건, 수압차(delta P) 6건, 감압 생략 3건, 프로펠러 충격 3건, 출수 중 추락 2건 및 수중폭발, 충전 중 공기통 폭발, 일산화탄소 중독, 드라이 슈트 침수, 토사에 의한 매몰이 각 1건이었다.

이상의 2020년부터 2024년까지(5년간)의 잠수관련 사망사고 사례 40건을 분석한 최종 결론으로 우리나라 산업잠수분야 사망사고의 주요 원인은 안전규칙 위반 및 관리소홀, 부적합한 장비사용 및 훈련 부족 등 대부분의 후진적 선행요인(predisposing factor)과 사고에 대비한 마땅한 구조방안 부재에 따른 구조지연(failure to rescue)이 복합적으로 상호작용하여 발생하는 것으로 판단된다.

따라서 우리나라 산업잠수분야에서의 반복적인 사망사고 예방을 위해서는 우리나라 산업잠수의 후진적 특성을 제대로 파악하고 사고예방의 의무주체로서 규칙

준수 등 안전에 대한 획기적인 인식의 변화가 필요해 보인다. 또한 이를 뒷받침하기 위해 산업안전보건원과 법 이론에 충실한 규칙 개정과 함께 교육 및 낙후된 장비 등 사고발생에 취약한 작업환경 개선을 위한 정부 차원의 지원이 병행되어야 할 것으로 판단된다.

한편, 공기호스 파단 시 역 빨림(vacuum up), 수중 차압(delta-P) 사고 시 현장수습, 작업 중 공기고갈 사례 등 현장 실무자 인터뷰를 좁은 의미에서 수행하였다. 향후 다양한 실제 사고사례를 좀 더 구체적으로 살펴볼 수 있도록 종합적 연구를 진행한다면 우리나라 산업잠수분야에서 발생하는 후진적 형태의 사망사고를 예방하는데 많은 도움이 될 것으로 판단되었다.

References

- Association of Diving Contractors International(ADCI). International consensus standards for commercial diving and underwater operations(6.2 Edition). Houston, Association of Diving Contractors International Inc.:2016. p.10.3
- Australian Diver Accreditation Scheme(ADAS). Occupational SCUBA to 30m (Part 1),2024,[accessed 2024 Dec 31]. Available from: <https://adas.org.au/course/restricted-occupational-scuba-to-30m-part-1-restricted/>
- Busan MBC. Finding on the Bujeon-Masan railway tunnel ground condition. (Pusan MBC News Desk on 2024 Sep 19). [accessed 2024 Dec 30]. Available from: https://busanmbc.co.kr/01_new/new01_view.asp?idx=267602
- Cha SG, Byun YS, Jeon MJ, Sakong J. Diving patterns and decompression sickness among South Korean fishery divers. *Journal of Occupational Health* 2019; 61(1):143-153 <https://doi.org/10.1002/1348-9585.12035>
- Denoble PJ, Caruso JL, Dear GdeL, Pieper CF, Vann RD. Common causes of open-circuit recreational diving fatalities. *Undersea Hyperb Med* 2008;35(6): 393-406 <https://www.researchgate.net/publication/23955484>
- Health and Safety Executive(HSE). Differential pressure hazards in diving. 2009. [accessed 2024 Dec 31]. Available from: <https://www.hse.gov.uk/research/rrpdf/rr761.pdf>
- Heo G, Lim SW, Shin HO. Current status of diving and institutional improvement plan of diving apparatus

- fishery in the southern coast of Korea. *J Kor Soc Fish Technol* 2015;51(1):136-145 <http://dx.doi.org/10.3796/KSFT.2015.51.1.136>
- Hermans F. Disaster survey report that occurred during the great east japan earthquake restoration work of the breakwater underwater explosion disaster. 2018.[accessed 2024 Dec 31]. Available from: [file:///C:/Users/wetst/Downloads/Japanese_cutting_accident_survey%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/wetst/Downloads/Japanese_cutting_accident_survey%20(1).pdf)
- Hermans F. Survey and analysis of fatal accidents in the commercial diving sector. 2016.[accessed 2024 Dec 30]. Available from: https://www.academia.edu/27691526/SURVEY_AND_ANALYSIS_OF_FATAL_ACCIDENTS_IN_THE_COMMERCIAL_DIVING_SECTOR
- International Marine Contractors Association(IMCA). Design for surface oriented (air) diving systems. London, IMCA D 023 Rev.1.2014 <https://www.imca-int.com/>
- International Marine Contractors Association(IMCA). IMCA safety flash 05/04, 2004. [accessed 2024 Dec 30]. Available from: <https://imcaweb.blob.core.windows.net/wp-uploads/2020/06/IMCASF-05-04.pdf>
- Jung JW. A study on the problems and improvement of occupational safety and health standards; focusing on regulation on occupational safety and health standards. *JKSOEH* 2024;34(2):148-155 <https://doi.org/10.15269/JKSOEH.2024.34.2.148>
- Kang JH. The cause analysis of the diving fatalities and preparation on the safety measure - focusing on accidents investigation report. 2022. <https://www.kosha.or.kr/kosha/researchField/researchReportSearch.do?mode=view&articleNo=438576&article.offset=140&articleLimit=5>
- Kim MW. Legal issues for expanding the introduction of telemedicine. *Kyungpook Natl. Univ. Law Journal* 2024; 84:97-122 <http://doi.org/10.17248/knulaw..84.202401.9>
- Kim YS. Technical approach for the postmortem examination of scuba diving fatality. *Korean J Leg Med.* 2014;38(1):1-7 <http://dx.doi.org/10.7580/kjlm.2014.38.1.1>
- Korea Occupational Safety and Health Agency(KOSHA). Accident release report. [accessed 2024 Dec 30]. Available from: https://www.kosha.or.kr/kosha/report/kosha_news.do
- Kulkarni AC. Rescue of a saturation diver, unconscious due to an explosion underwater. *Int Marit Health* 2021;72(1):46-48 <https://doi:10.5603/IMH.2021b.0006>
- Kulkarni AC. Saturation diver fatality due to hydrogen sulphide while working on a subsea pipe line. *Diving Hyperb Med.* 2021a;51(1):94-97 <https://doi:10.28920/dhm51.1.94-97>
- Lance RM, Bass CR. Underwater blast injury: a review of standards. *Diving Hyperb Med.* 2015;45(3):190-9 <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/26415071/>
- Lee HS, Oh JS, Choi SH. Development of an underwater rope-cutter device and controller for removal of propeller and shaft foreign material for small vessel. *Korean Soc. Mar. Environ. Saf.* 2019;25(7):927-935 <https://10.7837/kosomes.2019.25.7.927>
- Lee JH, Jung SK, Lee YJ, Oh SH, Kang HD. Hyperbaric oxygen therapy for decompression sickness: five-year experience in a single center. *Hyperbaric medicine* 2022; 33(6):589-598
- Lippmann J, Stevenson C, McD Taylor D, Williams J, Mohebbi M. Chain of events analysis for a scuba diving fatality. *Diving Hyperb Med.* 2017;47(3):144-154 <https://doi:10.28920/dhm47.3.144-154>
- Ministry of Oceans and Fisheries(MOF). Fishing permission status by diving for province and city, 2024. [accessed 2024 Dec 31]. Available from:https://www.mof.go.kr/synap/view.do?fn=MOF_ARTICLE_58510_20240903191b7d59d6d550&fd=202505
- Na JY, Park JW, Yoon SH, Park JS, Choi BH, Kim YS. Diver death due to underwater explosion. *Korean J Leg Med* 2014;38(4):171-174 <http://dx.doi.org/10.7580/kjlm.2014.38.4.171>
- National Institute of Occupational Safety and Health, Japan(JNIOOSH). Disaster survey report that occurred during the great east japan earthquake restoration work of the breakwater underwater explosion disaster. 2016. [accessed 2024 Dec 31]. Available from: https://www.jniosh.johas.go.jp/publication/pdf/saigai_houkoku_2016_06.pdf
- Occupational Safety and Health Administration(OSHA). 29 CFR Part 1910, Subpart T - commercial diving operation. U.S. Department of Labor, 2011.
- Occupational Safety and Health Administration(OSHA). Diving fatality investigation summaries. [accessed 2024 Dec 30]. Available from: <http://www.osha.gov/pls/imis/accidentsearch.html>
- Occupational Safety and Health Research Institute (OSHRI). A research report of the study on the actual condition and cost-benefit analysis for commercial diving work. Ulsan, OSHRI; 2015. p. 23

Oh DY. A study on issues in applying the serious accidents punishment act; focusing on serious industrial accidents. KLAJ 2022; 71(4):324-350
[https://doi: 10.17007/klaj.2022.71.4.010](https://doi.org/10.17007/klaj.2022.71.4.010)

Park SW, Kim WS, Yoon HS. An experimental study on the surface rescue scenarios for surface supplied helmet divers considering diving support vessel's freeboard height. JFMSE 2019;31(4):994-1,008
[https://doi:10.13000/JFMSE.2019.8.31.4.994](https://doi.org/10.13000/JFMSE.2019.8.31.4.994)

Park SW, Yoon HS. A case study on the fatal accidents of the commercial diving activity in Korea. JFMSE 2020; 32(5):1081~1092
<https://doi.org/10.13000/JFMSE.2020.10.32.5.1081>

Park SW, Yoon HS. An experimental study on the decompression diver rescue scenario of surface-supplied helmet divers. JFMSE 2021;33(3):655-666
[https://doi:10.13000/JFMSE.2021.6.33.3.655](https://doi.org/10.13000/JFMSE.2021.6.33.3.655)

Park SW. A Study on the Diving Accidents and the Self-other Rescue Scenario of Helmet Divers.

Doctoral dissertation, Pukyong National University. Pusan. 2021. p.7-20

Statistics Korea. Industrial accident status. 2024. [accessed 2024 Dec 30]. Available from: https://www.index.go.kr/unity/potal/main/EachDtlPageDetail.do?idx_cd=1514

US Navy. U.S. Navy diving manual, revision 7. Washington: U.S. Government Printing Office; 2018. p.17-3

Woo DH, Kang SY, Lee MG. A case study of nitrox usage in diving operation of the Busan-Geoje fixed link immersed tunnel. Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety 2015;21(6):790-797
<http://dx.doi.org/10.7837/kosomes.2015.21.6.790>

<저자정보>

박상원(겸임교수/연구소장), 김원석(전무이사/대표), 윤한삼(교수)