

세월호 참사 현장에서의 수중 수색 및 구조 작업을 위한 표면 공급식 잠수(Part II): 적용성 평가 및 운영·관리 방안

Surface-Supplied Diving System for Underwater Search and Rescue Operations at the Sewol Ferry Disaster Site (Part II): Applicability Evaluation and Operational Management Strategies

이우동*** · 김연중*** · 김태윤**** · 김명훈*****

Woo-Dong Lee***, Yeonjoong Kim***, Taeyoon Kim**** and Myounghoon Kim*****

요 지 : 본 연구(Part II)는 세월호 침몰 참사 현장과 같이 조류가 강하고 수심이 깊은 해역에서 표면 공급식 잠수의 안전하고 효율적인 적용 가능성을 평가하고 구체적인 운영·관리 방안을 제시하는 것을 목적으로 한다. 이를 위해 Part I에서 수립한 표면 공급식 잠수 계획을 토대로, 세월호 사고 해역의 조류 조건을 고려하여 잠수 가능 시간, 잠수 횟수 및 투입 인력 등을 스쿠버 잠수와 정량적으로 비교·분석하였다. 분석 결과, 표면 공급식 잠수는 깊은 수심에서 체계적인 감압 절차 적용을 통해 잠수사의 안전성을 확보할 수 있으며, 장시간 수중 작업이 가능하여 스쿠버 잠수에 비해 작업 효율성 측면에서 크게 유리한 것으로 나타났다. 반면, 표면 공급식 잠수는 장비 설치 및 운용에 많은 인력과 시간이 소요되어 긴급 상황에서 신속한 대응과 기동성이 떨어지는 한계가 있다. 따라서 전체 내부나 접근이 어려운 제한적인 구역에서는 스쿠버 잠수와 혼합 운용하는 전략이 효율적임을 확인하였다. 또한 야간 잠수, 기체 공급, 통신 시스템 및 생명줄 관리 등 세부적인 운용 및 관리 방안을 검토하였다. 나아가 본 연구를 통해 해양 환경에 따른 전문 인력 배치와 시간별 잠수 계획을 통해 향후 해양 재난 현장에서 실질적으로 활용될 수 있는 계기가 마련되었다.

핵심용어 : 감압 잠수의 관리, 잠수 작업, 산업 잠수, 해양 물리 환경, 해난구조

Abstract : This study (Part II) evaluates the applicability and operational efficiency of the surface-supplied diving system (SSDS) for safe underwater search and rescue activities in ocean environments characterized by strong tidal currents and deep waters, exemplified by the 2014 Sewol ferry disaster. Based on the SSDS dive plan developed in Part I, quantitative comparisons were conducted between SSDS and self-contained underwater breathing apparatus (SCUBA) diving, considering actual tidal conditions at the accident site. Dive duration, dive frequency, and personnel requirements were analyzed. Results indicate that SSDS ensures diver safety through systematic decompression procedures at greater depths and facilitates extended underwater operations, significantly improving operational effectiveness compared to SCUBA diving. However, due to extensive equipment setup and higher personnel demands, SSDS presents limitations regarding rapid emergency response and maneuverability. Therefore, a hybrid diving strategy combining both SSDS and SCUBA diving methods is recommended for confined or difficult-to-access spaces. Additionally, detailed operation and management guidelines for night diving, gas supply, communication systems, and lifeline handling were reviewed. This study establishes practical foundations for future underwater search and rescue operations in similar maritime disasters through professional diver-team configurations and daily dive schedules reflecting ocean environmental conditions.

Keywords : decompression dive management, diving operation, Commercial diving, physical ocean environment, maritime search and rescue

*경상국립대학교 해양토목공학과 부교수(Associate Professor, Department of Ocean Civil Engineering, Gyeongsang National University)

**호주 울런공대학교 토목·광업·환경·건축공학부 객원 부교수(Visiting Associate Professor, School of Civil, Mining, Environmental and Architectural Engineering, University of Wollongong, Australia)

***한국환경연구원 물국토연구본부 통합물관리연구실 부연구위원(Research Fellow, Water and Land Research Group, Division for Integrated Water Management, Korea Environment Institute)

****국립부경대학교 소방공학과 조교수(Assistant Professor, Department of Fire Protection Engineering, Pukyong National University)

*****경상국립대학교 해양산업연구소 선임연구원(Corresponding author: Myounghoon Kim, Senior Researcher, Ocean Industry Institute, Gyeongsang National University, 2, Tongyeonghaean-ro, Tongyeong, Gyeongnam 53064, Korea, Tel: +82-55-772-9126, Fax: +82-55-772-9129, koko0925@gnu.ac.kr)

*****대한민국 해군 해난구조전대 상사(Chief Petty Officer, Sea Salvage & Rescue Unit (SSU), Republic of Korea Navy)

1. 서 론

해양 자원 개발과 해상 운송 규모가 커지면서, 해양 강대국들은 잠수 분야를 안전하게 운영하기 위해 전문적인 교육 매뉴얼과 제도를 체계적으로 마련해 왔다(Joiner, 2007; IMCA, 2014; ADCI, 2016). 특히, 영국의 안전보건청(Health and Safety Executive, HSE), 미국의 해양대기청(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA), 그리고 미 해군(United States Navy, U.S. Navy) 등은 잠수사의 안전 확보와 잠수 기술 표준화를 위해 다양한 연구와 실무 매뉴얼을 발행하고 있다(HSE, 2014; NOAA, 2020; U.S. Navy, 2018). 이러한 체계적인 접근 덕분에 해외에서는 군사 잠수, 산업 잠수 등 전문 분야에서 잠수 안전성과 효율성을 높이는 다양한 시도가 이루어지고 있다.

최근, 우리 연구진도 잠수 안전성과 작업 효율성을 높이기 위한 연구가 일부에서 수행되고 있다. 대표적으로 Lee et al. (2019a)은 Yount et al.(2000)의 VPM(Variable Permeability Model)을 도입하여 잠수 모의 기술을 개발하였고, 이를 통해 공기 잠수(Lee et al., 2019b)와 나이트록스(Nitrox) 잠수(Lee, 2020)의 안전성 개선 방안을 검토하였다. 또한, Lee et al.(2021)은 CFD(Computational Fluid Dynamics; Lee et al., 2020)와 VPM을 결합하여 파랑 하중이 수중 작업자의 갑압 과정에 미치는 영향을 분석함으로써, 잠수 계획 수립의 정밀도를 한층 높이는 성과를 보였다. 이처럼 국내에서도 잠수 이론과 해양공학을 접목한 융합 연구가 확대됨에 따라, 보다 안전하고 효율적인 잠수 운용 체계를 마련하려는 움직임이 지속되고 있다.

2014년 4월 16일 발생한 세월호 침몰 참사는 선박 재난 시 신속하고 효과적인 수중 수색 및 구조 작업의 중요성을 일깨운 사건이었다(Jeon et al., 2022). 그러나 참사 당시 현장의 해양환경은 수색 및 구조 작업에 많은 난관을 초래하였다. 특히, 침몰 해역인 진도 맹골수도 수심이 깊고 유속이 빨라 잠수 시간이 매우 제한적이었으며, 수중 수색 및 구조 작업의 효율성이 크게 저하되었다(Kim et al., 2023; Kim et al., 2025; Lee et al., 2025). Humphrey et al.(2011)에 따르면, 이러한 해양환경에서도 표면 공급식 잠수는 수중 작업의 안전성과 효율성을 크게 확보할 수 있다. 특히, 강한 조류, 흐린 시야, 호흡 기체 제한 등을 어느 정도 극복할 수 있는 장점을 가지고 있다.

표면 공급식 잠수는 수면에서 호흡 기체를 지속적으로 공급받아 긴 수중 체류 시간이 가능하고, 갑압 절차를 적용하여 수심이 깊은 환경에서도 안전하게 작업할 수 있는 장점이 있다. 그렇다고 장점만 있는 것이 아니다. 장비 착용 및 설치 시간이 길고, 운용에 많은 인력이 요구되어 기동성이 떨어지는 한계도 존재한다. 또한, 수면과 연결된 생명줄은 호흡 기체를 무한하게 공급하지만, 이 때문에 이동 범위가 제한된다. 이러한 맥락에서, Part I에서는 표면 공급식 잠수의 역사

적 발전과 이론적 배경을 고찰하고, 미국 해군의 갑압 알고리즘을 적용하여 세월호 참사 현장의 조건을 반영한 잠수 계획을 수립하였다(Lee et al., 2025).

본 연구(Part II)에서는 Part I에서 수립한 표면 공급식 잠수 계획을 기반으로, 세월호 침몰 현장의 조류 환경을 고려한 스쿠버 잠수와 비교·분석을 통해 현장 적용성과 효율성을 평가한다. 그리고 강한 조류와 같은 열악한 해양환경에서 표면 공급식 잠수의 운영 및 관리 방안을 검토한다. 최종적으로는 현장 여건을 고려한 스쿠버 잠수와 표면 공급식 잠수의 혼합 운용 전략을 제안하여 향후 유사 사고 발생 시 실질적인 대응 전략을 제공하고자 한다.

2. 표면 공급식 잠수의 적용성 및 효율성

본 연구에서는 수중 수색 및 구조 작업에 적용되는 표면 공급식 잠수 시스템의 효율성에 대해 논의한다. 이를 위해 조류를 고려한 스쿠버 잠수(Kim et al., 2025)와 표면 공급식 잠수(Lee et al., 2025)의 일별 계획을 상호 비교·분석한다.

2.1 잠수 시간

스쿠버 잠수 장비의 사용 한계 유속은 0.514 m/s(1 kn)인 반면, 표면 공급식 잠수 장비는 0.772 m/s(1.5 kn)로 약 1.5배 높은 한계 유속을 갖는다. 이를 근거로 산출한 장비별 일일 잠수 가능 시간을 비교하면 Fig. 1과 같다. 여기서는 대표적으로 대조기와 소조기에 대해 각각 도시한다.

조류가 강한 대조기 조건(2014년 5월 16일)에서는 표면 공급식 잠수 장비로 총 420분 동안 잠수가 가능하며, 이는 스쿠버 장비의 260분에 비해 약 1.62배 긴 잠수 시간이 확보됨을 의미한다. 반면, 조류가 약한 소조기 조건(2014년 5월 8일)에서는 스쿠버 잠수가 총 1,180분 동안 가능하지만, 표면 공급식 잠수는 24시간(1,440분) 동안 수행할 수 있어 약 1.22

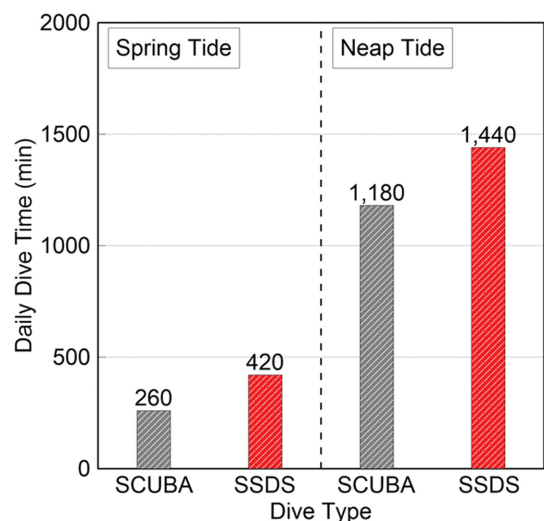


Fig. 1. Daily available dive time for SCUBA and SSDS diving equipment at spring tide and neap tide.

배 더 긴 잠수 시간이 확보된다.

표면 공급식 잠수 장비의 사용 한계 유속이 스쿠버 장비에 비해 높으므로, 잠수 시간이 길어지는 결과를 가져온다. 따라서 우리나라 서해와 같이 조류의 영향이 큰 해역에서는 수중 수색 및 구조 작업에 표면 공급식 잠수 장비를 적용할 경우 보다 긴 작업 시간이 확보되어 효과적인 잠수 수행이 가능하다.

2.2 잠수 횟수

Fig. 2는 Lee et al.(2025)이 분석한 대조기와 소조기 조건에서의 일일 표면 공급식 잠수 가능 횟수를 제시하며, 비교를 위해 Kim et al.(2025)의 스쿠버 잠수 잠수의 일일 잠수 가능 횟수도 함께 나타낸다.

조류가 강해 잠수 가능 시간이 짧은 대조기 조건에서는 스쿠버 장비를 이용한 선체 잠수와 해저 잠수의 일일 잠수 횟수가 각각 4회와 18회이다. 반면, 표면 공급식 장비를 사용할 경우, 선체 잠수는 동일하게 4회, 해저 잠수는 11회로, 해저 잠수에서는 스쿠버 장비에 비해 잠수 횟수가 작다.

조류가 약해 긴 잠수 가능 시간이 확보되는 소조기 조건에서는 스쿠버 장비를 이용한 선체 잠수와 해저 잠수가 각각 31회와 49회이며, 표면 공급식 잠수를 적용하면 선체 잠수는 25회, 해저 잠수는 45회가 가능하다. 스쿠버 잠수는 1회 단일 잠수 시간이 짧기 때문에 전체 잠수 가능 시간이 짧더라도 잠수 횟수가 많게 산출된다.

이와 같이 조류 조건에 따라 표면 공급식 잠수와 스쿠버 잠수의 일일 잠수 가능 횟수의 차이가 발생하며, 이 잠수 횟수는 투입 인력과 직결되는 중요한 요소이다.

2.3 인력 투입

Fig. 2에서 분석한 잠수 가능 횟수를 바탕으로 요구되는 잠수 전문 인력을 Fig. 3에 나타낸다.

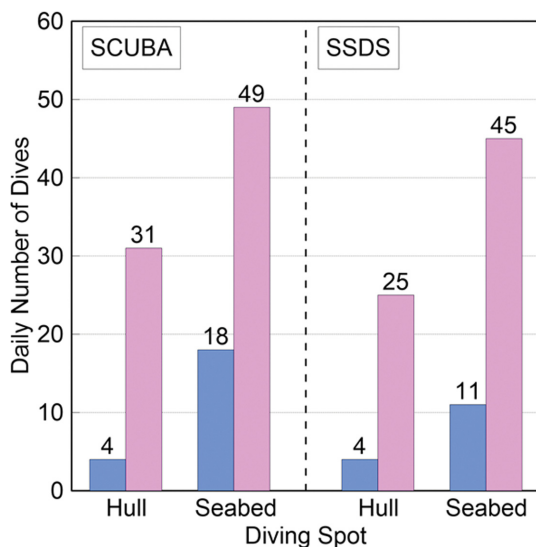


Fig. 2. Daily number of dives available for SSDS diving under spring tide (blue bars) and neap tide (red bars) conditions, compared with SCUBA diving.

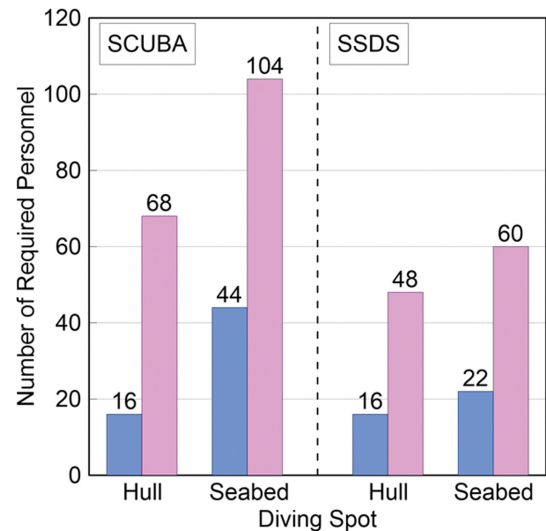


Fig. 3. Daily deployment of specialized dive personnel for SSDS diving under spring tide (blue bars) and neap tide (red bars) conditions, compared with SCUBA diving.

수 전문 인력을 Fig. 3에 나타낸다. 여기서는 스쿠버 잠수 (Kim et al., 2025)와 표면 공급식 잠수(Lee et al., 2025)에 투입되는 인력을 각각 표시하여 조류 조건과 선체 및 해저 잠수에 대해 상호 비교·검토한다.

대조기 조건에서 선체 잠수에 요구되는 전문 잠수 인력은 16명으로 동일하지만, 해저 잠수에서는 스쿠버 잠수가 2배 많은 44명이 투입되어야 한다(표면 공급식 잠수는 22명). 잠수 가능 시간과 잠수 횟수가 많은 소조기 조건에서도 전체적으로 스쿠버 잠수에 요구되는 인력이 더 많다. 선체 잠수의 경우, 스쿠버 잠수는 68명(1.42배), 표면 공급식 잠수는 48명으로 스쿠버 잠수가 20명 더 필요하다. 해저 잠수에서는 스쿠버 잠수에 104명(1.73배)이 필요한 반면, 표면 공급식 잠수는 60명으로 44명 차이가 발생한다.

전반적으로 스쿠버 잠수의 일일 투입 인력이 표면 공급식 잠수보다 많음을 알 수 있다. 특히, 잠수 가능 시간이 많이 확보되는 소조기 조건의 해저 잠수에서는 100명 이상의 인력이 요구된다. 따라서 수중 수색 및 구조 작업에 필요한 전문 잠수 인력을 확보·관리하는 측면에서는 스쿠버 잠수보다 표면 공급식 잠수가 유리할 것으로 판단된다.

2.4 수중 작업시간

잠수의 특성상, 하강 및 상승 시간(감압 시간 포함)을 제외한 순수 수중 작업시간이 잠수의 효율성을 결정하는 중요한 요소이다. 본 연구에서는 스쿠버 잠수와 표면 공급식 잠수 방식에 따른 실제 수중 작업시간을 산출하여 비교·분석하였다. Fig. 4는 각 잠수 방식별로 선체 잠수와 해저 잠수에서 확보할 수 있는 일일 실질적 수중 작업시간을, 대조기 조건과 소조기 조건에서 산출한 결과를 보여준다.

대조기 조건에서는 선체 잠수에서 스쿠버 잠수는 1회당 31분씩 4회 잠수를 통해 총 124분의 작업시간이 주어진다. 표

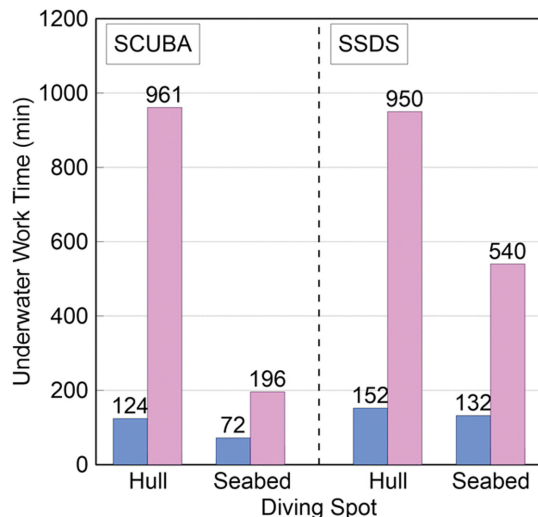


Fig. 4. Daily effective underwater work time for SCUBA and SSDS diving for hull and seabed operations under spring tide (blue bars) and neap tide (red bars) conditions.

면 공급식 잠수는 1회당 38분씩 동일 4회 잠수를 통해 152분의 작업시간을 확보할 수 있다. 해저 잠수에서는 스쿠버 잠수가 1회당 4분씩 18회 잠수에서 총 72분의 작업시간이 산출된다. 표면 공급식 잠수는 1회당 12분씩 11회 잠수를 통해 132분의 작업시간이 주어진다.

소조기 조건의 선체 잠수에서는 31회 스쿠버 잠수를 통해 총 961분, 25회 표면 공급식 잠수에서 950분의 작업시간을 각각 확보할 수 있다. 해저 잠수의 경우에는 49회 스쿠버 잠수에서 196분, 45회 표면 공급식 잠수에서는 540분의 작업시간이 각각 주어진다.

한편, Fig. 5와 같이 일일 잠수 가능시간 대비 실질적 수중 작업시간의 비율도 검토할 필요가 있다. 대조기 조건에서

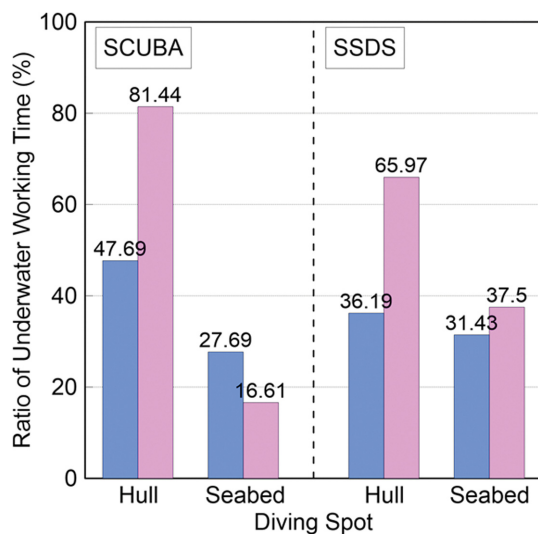


Fig. 5. Daily ratio of effective underwater work time relative to available diving time for SCUBA and SSDS diving for hull and seabed operations under spring tide (blue bars) and neap tide (red bars) conditions.

는 스쿠버 잠수의 선체 잠수가 47.69%, 해저 잠수가 27.69%의 작업시간 비율을 보이며, 표면 공급식 잠수에서는 선체 잠수가 36.19%, 해저 잠수가 31.43%의 비율을 나타낸다. 소조기 조건 하에서 스쿠버 잠수는 선체 잠수에서 81.44%, 해저 잠수에서 16.61%의 작업시간 비율을 나타낸다. 표면 공급식 잠수는 선체 및 해저 잠수에서 각각 65.97%와 37.50%의 작업시간 비율을 보인다.

스쿠버 잠수는 무압 잠수를 원칙으로 하기 때문에 선체 작업 시 상대적으로 높은 작업시간 비율을 보인다. 또한, 해저 잠수에서는 압압 절차를 전제로 하는 표면 공급식 잠수가 보다 긴 수중 체류시간을 확보할 수 있어 작업시간 비율이 증가하는 것으로 나타난다.

이와 같이, 동일한 조건 하에서 스쿠버 잠수에 비해 표면 공급식 잠수가 해저 잠수 시 훨씬 긴 실질적 수중 작업시간을 제공한다. 전체적으로 실제 수중 작업시간 측면에서는 표면 공급식 잠수가 스쿠버 잠수보다 유리하며, 잠수 가능시간 대비 작업시간의 비율에서는 선체 잠수에서는 스쿠버 잠수, 해저 잠수에서는 표면 공급식 잠수가 더 효과적인 것으로 확인된다. 이러한 결과는 수중 수색 및 구조 작업 시 잠수 형식을 결정하는 데 중요한 고려 요소로 작용할 수 있다.

2.5 적용성 분석

세월호 참사 현장 조건을 고려한 선체 및 해저의 수색 및 구조 작업에서 표면 공급식 잠수의 적용성을 평가하기 위해 스쿠버 잠수와 비교·분석하였다. 각 잠수 시스템의 장단점과 조류를 고려한 잠수 가능시간, 잠수 횟수, 인력 투입, 수중 작업시간, 작업시간 비율 등을 종합하면, 수심이 깊은 해저 잠수에서는 긴 수중 체류시간과 효율적인 인력 운용 측면에서 표면 공급식 잠수가 우수하다. 선체 잠수처럼 이동성이 중요한 환경에서는 스쿠버 잠수가 유리하다.

따라서 수중 수색 및 구조 작업의 성공적인 수행을 위해서는 해양 환경에 따라 잠수 방식을 상호 보완적으로 활용하는 혼용 운용 전략이 최적의 결과를 도출할 수 있다. 특히, 해저 작업과 같이 장시간의 수중 체류와 작업이 요구되는 경우에는 표면 공급식 잠수를 적극 추천하며, 선체 잠수의 경우에도 상황에 따라 표면 공급식 잠수의 적용 가능성을 검토함으로써 전반적인 작업 효율성과 안전성을 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

스쿠버 잠수와 표면 공급식 잠수를 혼용 운영하여 도난 무기 8정을 수심 12.19 m(40ft)에서 회수한 사례가 있다(Barsky, 2025). 수심이 깊지 않음에도 이 시간 동안 스쿠버 잠수하게 되면, 2시간이 넘어야 압압이 필요하게 된다. 이에 더 안전하고 효율적인 표면 공급식 잠수를 통해 수중에서 무기를 수색하고, 이동성이 용이한 스쿠버를 통해 회수하는 방식을 채택하여 하루 만에 작업을 완료하였다. 이를 통해 시간, 금전, 인력을 절약할 수 있었다.

3. 표면 공급식 잠수의 운영 및 관리 방안

일반적인 수심 및 수중 체류 시간을 기준으로, 현장 여건(인원, 시설, 장비 등)을 고려하여 잠수 계획을 수립한다. 그러나 실제 사고 현장의 해양 환경은 열악한 경우가 많아 여러 가지 어려움에 직면하게 된다. 이로 인해 해양 환경을 충분히 반영하지 않은 잠수 계획은 불필요한 인력과 시간의 낭비를 초래할 위험이 크다.

현재 우리나라 민·관·군의 잠수 분야에서는 국립해양조사원에서 제공하는 조석예보(KHOA, 2020)의 물때표만을 참고하여 잠수 계획을 수립하는 경우가 많다. 이로 인해 실제 현장에서 부적절한 계획이 적용되어 여러 문제가 빈번하게 발생하고, 운영 및 관리 과정에서 많은 시행착오를 겪고 있다. 본 연구에서는 조류 환경을 고려하여 수립한 표면 공급식 잠수 계획에 대한 철저한 운영 및 관리 방안을 논의한다.

3.1 조류를 고려한 운영 및 관리

대조기(2014년 5월 16일) 조건에서는 일일 최대 420분의 잠수 시간이 주어진다. 이는 선체 잠수를 1회, 해저 잠수를 2회 또는 3회씩 4회 수행할 수 있는 매우 제한적인 상황을 의미한다. 반면, 소조기(2014년 5월 8일) 조건에서는 24시간 잠수가 가능하므로, 장기간 연속 잠수에 따른 잠수사와 육상 인원(감독관, 지원요원)의 체력 및 건강 관리가 필수적이다.

3.1.1 조류가 강한 시기

잠수 활동은 수중에서 잠수사가 수행하는 만큼, 개인의 능력 차이가 작업 효율에 큰 영향을 미친다. 따라서 제한된 짧은 시간 내에 효율적인 수중 작업을 위해서는, 능력이 우수한 잠수사를 선발하고 적절한 잠수조를 구성해야 한다. 또한, 현장 상황을 면밀히 파악하고 풍부한 경험을 보유한 잠수사를 우선적으로 배치하는 것이 중요하다.

반면, 무분별한 인력 배치는 세월호 참사와 같이 장기간 잠수 작업이 요구되는 상황에서 많은 육상 지원 요원과 물적 자원의 낭비는 물론, 투입 인력의 피로 누적을 초래할 수 있다.

따라서 대조기와 같이 잠수 가능 시간이 제한된 조건에서는, 잠수사와 관련 인력에게 충분한 휴식을 제공하는 것이 필요하다. 그 이유는 소조기와 같이 대량 투입이 예상되기 때문이다.

3.1.2 조류가 약한 시기

소조기 조건에서는 24시간 잠수가 가능하므로, 장기간 연속 잠수에 따른 잠수사와 육상 인원(감독관, 지원요원)의 체력 및 건강 관리가 필수적이다. 비상 상황에서는, 예를 들어 세월호 참사와 같이, 안타까움과 절박함에 의해 무리하게 잠수하는 사례가 종종 발생한다. 특히, 잠수 시간이 제한되지 않는 소조기 조건에서는 해양 환경이 상대적으로 안정적이어서 이러한 무리한 잠수가 더욱 빈번해질 수 있다. 이 경우, 압박 병 증상이 발생하거나 심할 경우 인명 사고로 이어질 위험이 있다.

따라서 잠수 전체를 주관하는 감독관은 철저한 인원 관리와 반복 잠수로 인한 압박병 증상을 지속적으로 모니터링하여 잠수사의 건강을 유지하는 데 힘써야 한다. 또한, 육상 지원 요원의 건강 관리와 집중력 유지에도 각별한 주의를 기울여야 한다. 수중 상황에만 집중하면 지원 요원에 대한 관리가 소홀해져 사고로 이어질 수 있으므로, 감독관은 각 잠수 그룹의 임무를 명확히 숙지시키고 주기적인 교육을 실시해야 한다. 이를 위해 수중 작업뿐 아니라 육상 현장의 안전한 운영 및 관리를 책임질 수 있는 경험과 잠수 전문 지식을 갖춘 인력을 배치해야 한다.

3.2 주·야간 잠수 운영 전략

한국천문연구원의 일출·일몰 시간(KASI, 2020)을 토대로 조사한 결과, 표면 공급식 잠수의 주·야간 잠수 시간은 Table 1과 같다. 야간 잠수 비율은 대조기 조건에서 47.62%, 소조기 조건에서 38.89%를 차지한다. 대조기 조건에서는 주간 잠수와 야간 잠수로 명확히 구분되지만, 소조기 조건에서는 24시간 잠수가 가능하므로 동이 뜨고 해가 지는 주·야간이 연속적으로 교차된다. 세월호 참사와 같은 비상 상황에서는 주·

Table 1. Daytime and nighttime SSDS diving durations during spring and neap tides (analysis based on KASI, 2020)

Tide	Date (DD/MM)	Time Range (hh:mm)	Diveable Time (min)			Remarks
			Day	Night	Total	
Spring	16/05	01:30~03:20	0	110	110	Night Diving
		07:30~09:20	110	0	110	Day Diving
		13:10~15:00	110	0	110	Day Diving
		19:30~21:00	0	90	90	Night Diving
	Total		220	200	420	-
Neap	Proportion of Diving Time (%)		52.38	47.62	100	-
	08/05	00:00~24:00	880	560	1440	Day & Night Diving
		Total	880	560	1440	-
		Proportion of Diving Time (%)	61.11	38.89	100	-

야간 구분 없이 수중 수색 및 구조가 진행되므로, 이에 따른 표면 공급식 잠수의 적절한 운영 전략이 요구된다.

야간에 투입되는 잠수사의 시야 확보와 함께 육상 지원 요원의 시설 관리도 매우 중요하다. 예를 들어, 바지선 위에 이동형 표면 공급식 잠수 장비를 설치하여 잠수를 수행하는 경우, 체계적이지 않은 장비 구성으로 인해 야간 잠수 시 콘솔 작동자의 실수가 발생할 수 있다. 대부분의 이동형 콘솔은 소형 수심 및 압력 게이지로 구성되는데, 어두운 환경에서는 수심 변동을 인지하기 어렵거나 잠수사에게 공급되는 압력에 착오가 발생하여 안전사고로 이어질 위험이 있다.

또한, 우리나라 서해와 남해의 수중 시야는 대부분 저시정 상태이므로, 야간 잠수는 투입되는 잠수사에게 더욱 큰 부담으로 작용한다. 수중에서 시야 확보 여부는 임무 성공에 큰 영향을 미치며, 표면 공급식 잠수 장비의 장점 중 하나는 육상 전원 공급을 통해 고성능 수중 랜턴을 헬멧에 고정하여 사용할 수 있다는 점이다. 이를 통해 잠수사는 양손을 자유롭게 사용하여 작업할 수 있으며, 특히 손 사용이 많은 작업 환경에서는 스쿠버 잠수보다 효율적인 운영이 가능하다.

3.3 수중 안전 및 작업 효율성 관리

표면 공급식 잠수의 가장 큰 장점은 지속적으로 기체를 공급받을 수 있다는 점이다. 이로 인해 수심 제한이 줄어들고 수중 체류 시간이 증가하며, 감압 잠수가 가능해지는 등 스쿠버 잠수와 차별화된다. 또한, 잠수 생명줄 연결 덕분에 수중에서 길을 잃을 염려가 없고, 육상과의 실시간 통신이 가능하여 작업의 안정성과 효율성이 크게 향상된다. 이는 잠수 작업의 복잡성과 위험성이 높은 환경에서 표면 공급식 잠수가 매우 유용하게 활용될 수 있음을 의미한다.

변수가 많은 해양 환경에서 표면 공급식 잠수는 높은 안전성이 보장되며, 다양한 비상 상황에 효과적으로 대응할 수 있다. 예를 들어, 잠수 중 질소 마취나 산소 중독이 발생하더라도, 표면 공급식 잠수 장비의 음성 통신 기능을 통해 잠수사는 즉시 육상에 상황을 보고할 수 있다. 이로써 감독관은 대기 중인 잠수사를 신속하게 투입하거나 적절한 응급조치를 취할 수 있어, 스쿠버 잠수보다 훨씬 안정적인 작업 환경을 제공한다. 또한, 예상치 못한 상황으로 수중 체류 시간이 증가하더라도, 지속적인 기체 공급 덕분에 후속 조치를 원활하게 수행할 수 있다. 반면, 스쿠버 잠수는 잠수사의 개인 역량에 따라 비상 상황 대처 능력이 상이하고, 기체량이 제한되어 대응에 한계가 있다.

감압 잠수를 수행할 수 있는 표면 공급식 잠수는 긴 수중 체류 시간을 확보할 수 있는 장점 또한 가지고 있다. 육상에서 기체 공급원을 관리함으로써 기체 충전 및 교체가 신속하게 이루어지기 때문에 작업 중단 없이 임무에 집중할 수 있다. 반면, 스쿠버 잠수는 단회 체류 시간이 짧아 작업 완료 후 다음 잠수조에 인계해야 하는 경우가 많다. 특히, 대조기처럼 잠수 가능 시간이 제한된 상황에서는 인계 과정에서 추

가적인 소통 시간이 발생한다. 또한, 육상에서 기체를 거의 무한정 공급받을 수 있는 시스템 덕분에, 표면 공급식 잠수는 수중 체류 시간이 길어지더라도 감압 절차를 안전하게 완료할 수 있다. 이와 달리, 스쿠버 잠수는 자가 호흡 장치의 기체량 제약으로 인해 작업 시간이 제한된다. 이러한 이유로 대부분의 관련 단체와 기관에서는 안전을 우선시하여 스쿠버 잠수를 무감압 잠수로 제한하고 있다.

종합하면, 표면 공급식 잠수는 스쿠버 잠수에 비해 안전성과 작업 효율성을 동시에 향상시킬 수 있는 잠수 방식으로 판단된다.

3.4 주의 및 고려 사항

표면 공급식 잠수는 스쿠버 잠수에 비해 심해 작업 및 장시간 운영에 특화되어 있으나, 복잡한 장비 구성과 잠수 그룹 운영 프로토콜을 갖추어야 한다. 이 시스템의 운영에는 이중 공기 공급 시스템, 실시간 통신, 생명줄 관리 등 여러 복합 요소를 체계적으로 관리할 필요가 있다. 이에 관한 국제 규정에 기반한 주의 및 고려 사항은 다음과 같다.

3.4.1 비상 기체 공급 시스템

DAN(2008)에 따르면, 잠수 사고의 41%가 호흡 기체 부족으로 발생하며, 이중 시스템 도입 시 응급 상황 대응 시간이 50% 단축될 수 있다. 또한, DAN(2008)은 호흡 기체 부족으로 인한 동맥 가스 색전증 사례의 63%가 이중 시스템 미사용과 연관되어 있음을 보고하였다. 따라서 OSHA(2023)와 IMCA(2023a)가 의무화한 핵심 안전장치인 비상 기체 공급 시스템을 반드시 갖추어야 한다. IOGP(2020)에 따르면, 산업용 잠수에서 비상 기체 공급 시스템 적용 시 치명적 사고율이 0.82에서 0.55로 33% 감소한다. 다시 말해, 잠수사에게 주(Primary)와 백업(Backup) 기체 공급원을 동시에 연결하여, 비상 시 0.5초 이내에 자동 전환(ADCI, 2023)이 이루어지도록 함으로써 공급 중단 위험을 방지한다. 또한, 표면 공급식 잠수 시 비상에 대비하여 7리터 이상의 용량을 가진 베일아웃(Bailout) 실린더를 장착한다(U.S. Navy, 2018).

3.4.2 통신 시스템

표면 공급식 잠수에서 통신 시스템은 잠수사의 안전과 작업 효율성의 핵심 요소이다. 잠수 헬멧에 내장된 유선 음성 통신 회로는 매 잠수 전에 음질 테스트(IMCA, 2023b)를 통해 점검하며, 배터리 잔량 및 신호 강도(IMCA, 2024a)도 확인한다. 잠수사와 감독관 간 양방향 음성의 명확성을 확인하고(EPA, 2010), 잠수 중에는 15분 간격으로 음질 테스트를 실시한다(IMCA, 2023b). 동시에 감독관은 잠수사의 호흡 소리를 지속적으로 청취하여 과호흡이나 마스크 누수 등의 이상 징후를 탐지한다(U.S. Navy, 2018). 잠수사는 수심 변경, 작업 위치, 감압 상태, 호흡 가스 전환 등 모든 행동을 구두로 보고하며(OSHA, 2023), 음성 통신에 실패할 경우 대체

통신 방법(로프 신호, 라이트 신호, 수중 음향 통신 등)을 즉시 사용할 수 있도록 준비해야 한다(OSHA, 2023). 시야가 좋지 않은 해양 환경에서는 육상의 지원 요원과 잠수사 간에 줄 당김 신호 체계를 사전에 협의하고, 통신 두절 시 5초 이내에 즉시 비상 절차를 개시한다(IMCA, 2023b).

3.4.3 잠수 생명줄 및 관련 장비

생명줄은 EN15333 표준(CEN, 2008)을 만족하며, 3,500 N의 인장 하중을 견딜 수 있어야 한다. 또한, 가교 폴리에틸렌(Cross-Linked Polyethylene, XLPE) 절연체와 폴리아미드 튜브(Polyamide Tube)로 제작되어야 하며, 103.42 MPa (15,000 psi) 압력과 $-5\sim 120^{\circ}\text{C}$ 의 온도 범위에서 정상 작동해야 한다(ONGA, 2023). 매년 1회 이상 초경량 잠수 시스템(Extreme Lightweight Diving System, XLDS)의 생명줄은 작업 압력의 2배인 5.52 MPa(800 psi), 일반 생명줄은 1.5배인 2.76 MPa(600 psi)에 대해 검사를 수행할 것을 권고한다(Dive Lab, 2019). 그리고 매 잠수 전에는 절단, 팽창, 마모 등의 이상 여부를 육안으로 점검을 진행한다(EPA, 2010). 비상 시에는 생명줄을 이용하여 잠수사를 회수할 수 있어야 하며(ONGA, 2023), 생명줄의 이중화는 IMCA(2023a, 2023c, 2024b)에서 권장하는 핵심 안전 프로토콜로, 반드시 도입되어야 한다.

또한, 생명줄의 연결부와 잠수사의 하네스(Harness)는 임의로 분리되지 않도록 스테인리스 스틸 클립으로 체결되어야 한다(CEN, 2008). 잠수사의 하네스는 CEN(2008), IMCA(2024c, 2024d), ADCI(2024)의 기준을 만족해야 하며, 기준이 마련되지 않은 D-링, 바인딩, 카라비너 등 개별 부품에도 동일한 기준이 적용되어야 한다(4 Seas Safety Ltd., 2019). IMCA(2024e)는 비상 시 의식불명 잠수사의 인양을 위해 리프팅 하네스와 베일아웃 하네스를 분리할 것을 권고하며, 잠수사의 인양이 가능한 생명줄과 하네스의 인장 강도는 8,894.6 N (907 kgf) 이상이어야 한다(ADCI, 2024). 또한, 생명줄 파손 시에는 대기 다이버가 교체용 생명줄을 신속히 설치해야 한다(IMCA, 2024d). 그 밖에도, 수중 작업 중 육상 지원요원이 생명줄을 당기는 속도를 9.144 m/min(30 ft/min)로 제한할 필요가 있다(U.S. Navy, 2018).

3.4.4 수온에 대한 고려

2014년 4월 16일 세월호 참사 당일, 해안에 위치한 진도 검조소에서 관측된 수온은 $12.6\sim 12.7^{\circ}\text{C}$ 이다(KHOA, 2015). 세월호 침몰 지점과 수중의 수온은 이보다 더 낮았을 것으로 예상된다. 따라서 수온이 10°C 미만인 냉수 환경에서는 호흡 기체의 응결을 방지하기 위한 조치가 필요하다. 냉수용 레귤레이터가 요구되며, 공기 압축 장치에는 건조 필터와 응축수 배출 등 수분 분리 장치를 강화해야 한다(HSE, 2014). 또한, 잠수사의 체온 유지를 위해 보온 효과가 우수한 장갑과 후드를 착용하고(OSHA, 2023), 건식 잠수복과 온수 순환 및 공

급 시스템을 결합하여 열 손실을 최소화해야 한다(전기/화학식 발열 장비 착용, IMCA, 2023b). 냉수 환경에서는 혈관 수축으로 질소 배출이 지연되므로 감압 시간을 20% 연장하는 등(HSE, 2014; Looney et al., 2019) 조정할 필요가 있다. 반면, 28°C 이상의 온수 환경에서는 습식 슈트를 착용하여 체온 상승을 방지하고, 통풍 시스템이 장착된 잠수 헬멧을 사용하며(U.S. Navy, 2018), 잠수사의 탈수를 방지하기 위해 입수 전에 충분한 수분을 섭취해야 한다.

3.4.5 비상 준비 및 대기 체계

신속하게 투입이 가능한 스쿠버 잠수에 비해 표면 공급식 잠수의 준비 시간은 3배 이상 소요된다(ADCI, 2023). 이에 긴급 상황에 대비하여 대기 잠수사는 잠수사의 입수 시점으로부터 5분 이내에 투입 가능한 상태를 유지해야 한다. OSHA(2023)는 대기 잠수사도 잠수사와 동일한 장비를 착용하고 상시 대기할 것을 규정하고 있다.

3.4.6 감압 및 구조 지원

표면 공급식 잠수를 이용한 수중 수색 및 구조의 효율과 잠수사의 안전을 위해 감압 챔버를 비치하여 수중과 표면 감압을 동시에 지원할 수 있다. U.S. Navy(2018)에 따르면, 이를 통해 감압병 발생률이 70% 감소한다. 또한, 의식불명자의 인양을 위해 수중에서 선체로 이동하는 리프팅 시스템의 설치가 필요하다.

3.4.7 보조 시스템 활용

대규모 해양 사고 상황에서 표면 공급식 잠수의 효율성과 안전성을 확보하기 위해, ROV(Remotely Operated Vehicle) 및 수중 드론을 포함한 보조 시스템(Kang et al., 2022; Lee et al., 2022; Jin et al., 2024)의 통합 운영이 필수적이다. 우선, 위험 환경을 사전 탐색할 수 있으며(IMCA, 2024f), ROV를 활용하여 구조물 안정성·유류 유출 여부 등을 영상과 라이다(LiDAR)로부터 사전 및 실시간 확인할 수 있다. 다중 센서를 부착한 수중 드론(유속, 수온 등)을 이용하면 해양 환경 모니터링이 가능하며, 잠수 그룹에게 15분 간격으로 데이터를 전송할 수 있다(IMCA, 2024b). 더불어, ROV에 인양용 그리퍼를 장착하여 최대 500 kg 중량까지 인양을 지원할 수 있으며(IMCA, 2024a), 수중 드론에 쿼 커넥트 시스템을 장착하여 호흡 기체를 비상 시 수중으로 공급할 수 있다(IMCA, 2024a, 2024b).

3.4.8 국내 기준과 위험 평가

현재 국내에서는 표면 공급식 잠수에 대한 기준과 절차가 미비하므로, 공신력 있는 기관 및 단체에서 제시한 안전 프로토콜을 숙지해야 한다. 수중이라는 극한 환경에서 수행되는 작업인 만큼, 전문 지식을 갖춘 감독관은 다중 안전 계층(Multi-layer Safety) 원칙에 따라 유속, 작업 강도 등 현장 조

건에 맞게 운영을 조정해야 한다. 이를 위해 매 잠수 시 위험 평가(Hazard Identification, HAZID)를 필수적으로 수행해야 한다.

4. 결 론

본 연구에서는 세월호 참사 현장에서의 수중 수색 및 구조 작업을 대상으로 표면 공급식 잠수의 적용성을 평가하였다. 기존의 스쿠버 잠수 방식과 비교하여 표면 공급식 잠수가 가지는 장단점을 분석하고, 작업 환경과 조류 조건을 고려한 최적의 운영 방안을 제안하였다. 그 결과, 표면 공급식 잠수는 다음과 같은 측면에서 스쿠버 잠수에 비해 현장에서의 적용성이 뛰어난 것을 확인하였다.

- 조류 환경에서의 잠수 가능 시간 증가
 - 1) 조류의 영향을 받을 경우, 스쿠버 잠수의 사용 한계 유속(0.514 m/s)보다 표면 공급식 잠수의 한계 유속(0.772 m/s)이 더 높아, 동일한 환경에서 더 긴 시간 동안 작업할 수 있었다.
 - 2) 하루 평균 잠수 가능 시간이 스쿠버 잠수에 비해 대조기(강한 조류)에서는 약 1.62배, 소조기(약한 조류)에서는 약 1.22배 더 길었다.
 - 작업 효율성 향상
 - 1) 스쿠버 잠수는 짧은 무감압 한계 시간으로 인해 해저에서 실질적인 작업 시간이 매우 제한적이지만, 표면 공급식 잠수는 감압 절차를 적용하여 수중 체류 시간을 극대화할 수 있다.
 - 2) 수심 48 m 해저 잠수에서 스쿠버 잠수사의 실제 작업 가능 시간은 4분에 불과했으나, 표면 공급식 잠수를 활용하면 12분까지 연장할 수 있었다.
 - 3) 해저 구조물 탐색 및 인양 작업 등 시간이 많이 소요되는 작업에서 표면 공급식 잠수의 활용도가 높았다.
 - 투입 인력 및 장비 운영 최적화
 - 1) 스쿠버 잠수는 짧은 수중 체류 시간으로 인해 더 많은 다이버를 필요로 하는 반면, 표면 공급식 잠수는 적은 인원으로도 지속적인 수색 및 구조 작업이 가능하였다.
 - 2) 표면 공급식 잠수의 운영에는 장비 설치 및 유지보수가 필요하지만, 장기간 작업 시 인력 운영 측면에서 효율적이었다.
- 표면 공급식 잠수의 몇 가지 한계도 분명 존재하며, 다음과 같은 개선 및 보완이 필요하다.
- 초기 설치 및 운영의 복잡성
 - 1) 스쿠버 잠수에 비해 장비 준비 시간이 길고, 전문적인 교육과 훈련이 필요하다.
 - 2) 장비의 무게와 생명줄 연결로 인해 이동성이 제한될 수 있으며, 선체 내부 및 복잡한 구조물 탐색에는 스쿠버 잠수가 더 적합할 수 있다.
 - 야간 및 악천후 조건에서의 운영 방안 필요

- 1) 표면 공급식 잠수는 야간 작업 시 시야 확보를 위해 추가적인 조명 시스템 및 통신 장비의 보완이 필요하다.
 - 2) 강풍이나 높은 파도 등의 해상 조건이 악화될 경우, 육상 지원 시스템의 운영이 어려울 수 있으므로 이에 대한 대비책이 필요하다.
- 효율적인 혼합 운용 전략 필요
 - 1) 스쿠버 잠수와 표면 공급식 잠수는 각각 장점이 다르므로, 수색 및 구조 작업의 특성에 따라 최적의 운용 전략을 마련해야 한다.
 - 2) 선체 내부나 접근이 어려운 좁은 공간에서는 스쿠버 잠수를 활용하고, 장시간 수중 작업이 필요한 해저 작업에서는 표면 공급식 잠수를 적용하는 방식이 가장 효율적일 것으로 판단된다.

본 연구를 통해 표면 공급식 잠수의 높은 적용 가능성과 장점을 확인하였으며, 특히 장시간 작업과 깊은 수심에서의 수색 및 구조 작업에 효과적인 방식을 입증하였다. 하지만 초기 설치 및 운영의 복잡성을 고려할 때, 표면 공급식 잠수의 도입은 충분한 훈련과 장비 운영에 대한 전문성을 갖춘 인력을 확보하는 것이 필수적이다. 향후, 스쿠버 잠수와 표면 공급식 잠수를 조합한 혼합 운용 전략을 보다 정교하게 설계하여, 해양 재난 대응 체계를 최적화하는 방향으로 연구를 확장할 필요가 있다. 또한, 수중 무인 탐사 장비(Lee et al., 2022; Jin et al., 2024)를 수중 수색 및 구조에 적극 활용하여 작업 효율 향상과 잠수사의 안전을 도모할 수 있다.

감사의 글

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2024-00356327).

References

- 4 Seas Safety Ltd. (2019). Hazard observation: Diver to umbilical attachment (HOCH 07. Rev 05). Retrieved from https://www.oshcr.org/wp-content/uploads/oshcr/1737/2596_1737_9886b054-5c7b-4bb0-a40c-5ecf0af789ff.pdf
- ADCI (2016). International consensus standards for commercial diving and underwater operations (6.2 ed.). Association of Diving Contractors International.
- ADCI (2023). Consensus standards for commercial diving operations (ADCI 6.8.1). Association of Diving Contractors International. Retrieved from <https://www.adc-int.org/standards>
- ADCI (2024). International consensus standards for commercial diving and underwater operations (6.4th ed.). Association of Diving Contractors International. Retrieved from <https://www.adc-int.org/content.asp?contentid=173>
- Barsky, S. (2025). SCUBA vs. Surface Supplied Air. SDI, TDI, ERDI, PFI. Retrieved from <https://www.tdisdi.com/erdi-news/scuba-vs-surface-supplied-air/>

- CEN (2008). Respiratory equipment—Open-circuit umbilical supplied compressed gas diving apparatus—Part 1: Demand apparatus (EN 15333-1:2008). European Committee for Standardization. Retrieved from <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/18afd33c-76e9-4215-a561-92528e34b875/en-15333-1-2008>
- DAN (2008). Report on decompression illness, diving fatalities and project dive exploration. Durham, NC: Divers Alert Network.
- Dive Lab. (2019). Umbilical test manifold user information guide (Rev. 4/2019). Dive Lab Incorporated, Retrieved from <https://divelab.com/wp-content/uploads/2020/04/Umbilical-Test-Manifold-Manual-PRINTABLE-WORD-Rev-4-2019.pdf>
- EPA (2010). Region 10 Surface Supplied Diving SOP. Environmental Protection Agency. Retrieved from https://archive.epa.gov/region10/diving/web/pdf/epa-surfacesupply_3-15-10-r10-sop.pdf
- HSE (2014). Commercial diving projects offshore: Diving at work regulations 1997: Approved code of practice and guidance. L103 (2nd ed.), Health and Safety Executive, Retrieved from <https://www.hse.gov.uk>
- Humphrey, A., Grossman, S., McBurney, J. and Sheldrake, S. (2011). Use of Surface-Supplied Gas for Scientific Diving. In Proceedings of the American Academy of Underwater Sciences 30th Symposium. Dauphin Island, AL: AAUS.
- IMCA (2014). International code of practice for offshore diving (Rev. 2). D014, International Marine Contractors Association.
- IMCA (2023a). International Code of Safety for Diving Operations (IMO Resolution MSC.548(107)). International Marine Contractors Association. Retrieved from [https://www.wcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MSCResolutions/MS548\(107\).pdf](https://www.wcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MSCResolutions/MS548(107).pdf)
- IMCA (2023b). Guidance on diving operations in contaminated waters (IMCA D054 Rev. 2.1). International Marine Contractors Association. Retrieved from <https://www.imca-int.com/resources/technical-library/document/8cfa9babf-cb5e-ee11-8def-6045bd10f-ccc/>
- IMCA (2023c). Diving operations from vessels operating in a dynamically positioned mode (IMCA D010 Rev. 4). International Marine Contractors Association. Retrieved from <https://www.imca-int.com/news-events/press-releases/guidelines-for-dp-diving-operations-and-diving-umbilical-management/>
- IMCA (2024a). Guidance on hyperbaric evacuation systems (IMCA D046 Rev. 3). International Marine Contractors Association. Retrieved from <https://www.imca-int.com/resources/technical-library/document/7eaf9babf-cb5e-ee11-8def-6045bd10f-ccc/>
- IMCA (2024b). Guidance on diving umbilical management (IMCA D078 Rev. 0.2). International Marine Contractors Association. Retrieved from <https://www.imca-int.com/resources/technical-library/document/91c53e5f-c55b-ee11-8def-6045bdd0ef2e/>
- IMCA (2024c). Diving equipment systems inspection guidance note (DESIGN) for surface oriented (air) diving systems (IMCA D023 Rev. 2.3). International Marine Contractors Association. Retrieved from <https://www.imca-int.com/resources/technical-library/document/86afb9bf-cb5e-ee11-8def-6045bd10fccc/>
- IMCA (2024d). DESIGN for saturation (bell) diving systems (IMCA D024). International Marine Contractors Association. Retrieved from <https://www.imca-int.com/resources/technical-library/document/afd42e5e-c55b-ee11-8def-6045bdf1ea43/>
- IMCA (2024e). Diving equipment systems inspection guidance note (DESIGN) for surface oriented (air) diving systems (IMCA D023 Rev. 2.3). International Marine Contractors Association. Retrieved from <https://www.imca-int.com/resources/technical-library/document/86afb9bf-cb5e-ee11-8def-6045bd10fccc/>
- IMCA (2024f). Guidance on integrated diving operations with ROV support (IMCA D123). International Marine Contractors Association. Retrieved from <https://www.imca-int.com/d123>
- IOGP (2020). Safety performance indicators – 2019 data (Report 2019s). International Association of Oil and Gas Producers. Retrieved from <https://www.iogp.org/bookstore/product/safety-performance-indicators-2019-data/>
- Jeon, C., Knowles, S.G. and Park, S.E. (2022). Disaster (continued): Sewol Ferry investigations, state violence, and political history in South Korea. *History and Technology*, 38(1), 84-106.
- Jin, H.S., Kang, H., Kim, M.G., Lee, M.J. and Li, J.H. (2024). OGM-based real-time obstacle detection and avoidance using a multi-beam forward looking sonar. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 38(4), 187-198.
- Joiner, J.T. (2007). Commercial diver training manual. Best Publishing.
- Kang, H., Cho, G.R., Kim, M.G., Lee, M.J., Li, J.H., Kim, H.S., Lee, H. and Lee, G.S. (2022). Mission management technique for multi-sensor-based AUV docking. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 36(3), 181-193.
- KASI (2020). Sunrise and sunset time calculation. Astronomy and Space Knowledge Information, Korea Astronomy and Space Science Institute. Retrieved from <https://www.kasi.re.kr>
- KHOA (2015). Ocean Data in Grid Framework. Korea Hydrographic and Oceanographic Agency. Retrieved from <http://www.khoa.go.kr/oceangrid/gis/category/reference/distribution.do>
- KHOA (2020). Smart Tidal Forecast. Korea Hydrographic and Oceanographic Agency. Retrieved from [https://www.khoa.go.kr/swtc/main.do?pageType=pc\[1\]](https://www.khoa.go.kr/swtc/main.do?pageType=pc[1])
- Kim, M., Kim, S., Kim, T., Kim, J. and Lee, W.D. (2025). Daily planning and management of SCUBA diving for underwater search and rescue considering tidal currents: A case study of the Sewol ferry disaster site. *Journal of Coastal Disaster Prevention*, 12(1), 31-47 (in Korean).
- Kim, M., Song, M., Park, J., Kim, S. and Lee, W.D. (2023). Estimation of underwater workable time considering tidal currents: A review of diving equipment. *Journal of Coastal Research*, 116(Special Issue), 433-437.
- Lee, P.M., Park, J.Y., Baek, H., Kim, S.M., Jun, B.H., Kim, H.S. and Lee, P.Y. (2022). Underwater navigation of AUVs using uncorrelated measurement error model of USBL. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 36(5), 340-352.
- Lee, W.D. (2020). A study on optimal Nitrox for safe underwater

- works: Diving simulation-based assessments. *Journal of the Korean Society of Safety*, 35(1), 70-78 (in Korean).
- Lee, W.D., Kang, C., Hong, S., Lee, T.K. and Lee, J. (2021). Effect of wave load on decompression of underwater workers: CFD-VPM simulation. *Journal of Coastal Research*, 114(Special Issue), 614-618.
- Lee, W.D., Kim, J., Kim, T. and Kim, M. (2025). Surface-supplied diving system for underwater search and rescue operations at the Sewol ferry disaster site (Part I): Theoretical background and dive planning. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 37(2), 38-49 (in Korean).
- Lee, W.D., Kim, S.G., Kim, M.H. and Lee, J.H. (2019b). Air diving operation, management and planning for safe and effective underwater works. *Journal of the Korean Society of Safety*, 34(4), 103-110 (in Korean).
- Lee, W.D., Lee, J. and Lee, J.H. (2019a). Applicability of Nitrox diving for improved safety and efficiency of underwater operations. *Journal of Coastal Research*, 91(Special Issue), 206-210.
- Lee, W.D., Mizutani, N. and Hur, D.S. (2020). 2-D characteristics of wave deformation due to wave-current interactions with density currents in an estuary. *Water*, 12, 183.
- Looney, D.P., Long, E.T., Potter, A.W., Xu, X., Friedl, K.E., Hoyt, R.W., Chalmers, C.R., Buller, M.J. and Florian, J.P. (2019). Divers risk accelerated fatigue and core temperature rise during fully-immersed exercise in warmer water temperature extremes. *Temperature*, 6(2), 150-157.
- NOAA (2020). NOAA diving manual: Diving for science and technology (6th ed.). National Oceanic and Atmospheric Administration, Best Publishing Company.
- ONGA (2023). NORSOK U-100: Manned underwater operations (6th ed.). Norwegian Oil and Gas Association, the Federation of Norwegian Industries and Standards Norway. Retrieved from <https://standard.no/en/sectors/petroleum/norsok-standards/u-underwater-op/u-100manned-underwater-operations/>
- OSHA (2023). Commercial diving operations (29 CFR 1910 Subpart T). U.S. Department of Labor, Occupational Safety and Health Administration. Retrieved from <https://www.osha.gov/laws-regs/regulations/standardnumber/1910/1910.425>
- U.S. Navy (2018). U.S. Navy diving manual (Rev. 7). Naval Sea Systems Command.
- Yount, D.E., Maiken, E.B. and Baker, E.C. (2000). Implications of the varying permeability model for reverse dive profiles. In *Proceedings of the Reverse Dive Profiles Workshop*, Smithsonian Institution, 29-61.

Received 15 February, 2025

1st Revised 30 March, 2025

2nd Revised 2 April, 2025

Accepted 3 April, 2025