

세월호 참사 현장에서의 수중 수색 및 구조 작업을 위한 표면 공급식 잠수(Part I): 이론적 배경 및 잠수 계획 수립

Surface-Supplied Diving System for Underwater Search and Rescue Operations at the Sewol Ferry Disaster Site (Part I): Theoretical Background and Dive Planning

이우동*** · 김연중*** · 김태윤**** · 김명훈*****

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

요 지 : 본 연구(Part I)는 2014년 세월호 침몰 사고 현장과 같이 조류가 강하고 수심이 깊은 해역에서 수중 수색 및 구조 작업을 안전하게 수행하기 위한 표면 공급식 잠수의 이론적 배경을 고찰하고, 체계적인 잠수 계획 수립 과정을 제시하였다. 이를 위해 표면 공급식 잠수의 역사적 발전과 장비 구성 및 주요 특징을 소개하고, 미 해군의 감압 알고리즘을 바탕으로 체계적인 감압 절차를 설정하였다. 특히 수심 26 m의 선체 잠수와 수심 48 m의 해저 잠수를 대표적 작업 환경으로 설정하여 단일 잠수 프로파일을 제시하고, 조류 조건을 고려하여 잠수 가능 횟수 및 투입 인력을 산정함으로써 표면 공급식 잠수의 운영 계획을 수립하였다. 다만, 표면 공급식 잠수는 장비 설치 시간이 길고 운용 인력이 많아 긴급 상황에서 신속한 대응과 기동성 확보가 어렵기 때문에 스쿠버 잠수와 혼용 운용이 효과적일 것으로 판단된다. Part I에서 수립한 표면 공급식 잠수의 계획은 Part II에서 스쿠버 잠수와 비교 분석을 통해 적용성과 효율성을 평가하고, 구체적인 운영·관리 방안을 도출하는 데 활용된다.

핵심용어 : 수중 수색 및 구조, 표면 공급식 잠수, 감압 절차, 감압 잠수의 계획, 수중 안전

Abstract : This study (Part I) examines the theoretical background and proposes systematic dive planning procedures for the surface-supplied diving system (SSDS) to ensure safe underwater search and rescue operations in areas characterized by strong tidal currents and deep waters, such as the 2014 Sewol ferry disaster site. First, the historical development, equipment configurations, and key features of SSDS are introduced. Then, systematic decompression procedures based on the U.S. Navy algorithm are presented. Specifically, single-dive profiles are proposed for two representative underwater scenarios: hull diving at a depth of 26 m and seabed diving at a depth of 48 m. Based on these scenarios, optimal operational plans, including dive frequency and personnel allocation considering tidal conditions, are suggested. However, SSDS requires substantial equipment setup time and extensive manpower, limiting rapid emergency response capabilities. Therefore, a hybrid operation combining SSDS with self-contained underwater breathing apparatus (SCUBA) diving is recommended. The dive plans for SSDS developed in Part I provide foundational data for evaluating its applicability and efficiency through comparative analysis with SCUBA diving under various tidal conditions, as well as for establishing detailed operational and management strategies, which will be addressed in Part II.

Keywords : underwater search and rescue, surface-supplied diving system (SSDS), decompression procedure, decompression dive planning, underwater safety

*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

우리나라는 지정학적 위치와 역사적·경제적 배경을 바탕으로 해양 강대국으로 자리 잡아왔다. 해운, 조선, 해양 자원 개발, 해양 과학 연구 등 다양한 분야에서 세계적인 경쟁력을 보유하고 있으며, 이를 통해 글로벌 해양 강국으로서의 위상을 확고히 하고 있다(Seo and Bae, 2002). 특히, 선박 대형화와 특수 화물 운반의 증가로 인해 해양 산업 전반에서의 영향력이 더욱 확대되고 있으며, 이는 대한민국이 글로벌 경제에서 중요한 역할을 수행하는 데 기여하고 있다. 그러나 이러한 활발한 해양 활동은 해양 선박 사고의 발생 빈도와 규모 증가라는 문제를 동반하고 있다. 대표적인 사례로는 1993년 서해훼리호 침몰 사고, 2014년 세월호 침몰 사고 등이 있으며, 이들 사고는 해양 안전 체계의 미비점과 대응 방안의 한계를 여실히 드러냈다(Jeon et al., 2022).

기존 해양 사고 관련 연구들은 사고 원인 분석 및 대응 체계 개선을 위한 다양한 시도를 해왔다. 예를 들어, Seo and Bae(2002)는 선박의 대형화, 고속화, 특수 화물 운반 증가와 함께 해양 사고의 다양성과 규모가 점차 확대되고 있음을 강조하며, 최근 10년간의 사고 데이터를 분석하여 사고 예방 대책을 제시하였다. 또한 Fan et al.(2020)은 인간 요인이 해양 사고에 미치는 영향을 분석하고 이를 예방하기 위한 전략을 제안하며, 베이지안(Bayesian) 네트워크와 다기준 의사결정(Multi-Criteria Decision Making) 기법의 하나인 TOPSIS(Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution)를 활용해 체계적인 접근 방안을 모색하였다. 이러한 연구들은 해양 사고 예방 및 대응 체계 개선에 중요한 기여를 하였으나, 수중 수색 및 구조 작업과 관련된 잠수 작업 절차와 기준에 대한 연구는 상대적으로 부족한 실정이다.

Kim et al.(2025)은 세월호 참사 현장에서의 수중 수색 및 구조 작업을 위해 스쿠버(SCUBA; Self-Contained Underwater Breathing Apparatus) 잠수의 운영 및 관리 방안을 수립하고, 조류 조건을 고려한 효율적인 잠수 계획을 제안하였다. 특히 Kim et al.(2023)의 조류 예측 데이터를 활용하여 잠수 가능 시간을 분석하고 이를 바탕으로 선체 및 해저 작업을 위한 무감압 단일 잠수 계획을 수립하였다. 연구 결과에 따르면 스쿠버 잠수는 선체 내부 및 주변에서의 기동성이 뛰어나며 긴급 대응 상황에서 신속하게 투입될 수 있는 장점이 있는 반면, 수심이 깊어질수록 질소 마취와 산소 독성 위험이 증가하고 무감압 한계 시간이 급격히 단축되어 실질적인 작업 시간이 제한되는 문제가 발생하였다(Kim et al., 2025). 특히 수심 48 m에서의 해저 잠수에서는 실제 수중 작업 시간이 단 4분에 불과하여 작업 효율성이 현저히 저하됨이 확인되었다.

따라서 보다 깊은 수심에서 장시간 지속적인 작업이 요구되는 상황에서는 호흡 기체를 무제한으로 공급할 수 있는 표면 공급식 잠수(SSDS; Surface-Supplied Diving System)의 도입이 필요하다(Kim et al., 2025). 표면 공급식 잠수는 스

쿠버 잠수에 비해 체류 시간을 대폭 증가시킬 수 있으며, 호흡 기체 공급과 감압 절차를 정밀하게 관리할 수 있어 깊은 수심에서의 안전성과 작업 효율성을 크게 향상시킬 수 있다.

본 연구에서는 세월호 참사 현장 조건을 고려한 수중 수색 및 구조 작업에서 표면 공급식 잠수의 적용성을 평가한다. 먼저, Kim et al.(2023)이 제시한 조류 예측 및 잠수 가능 시간 데이터를 바탕으로 표면 공급식 잠수의 수중 수색 및 구조 작업에 대한 최적의 계획을 Part I에서 수립한다. 그리고 스쿠버 잠수에 관한 선행 연구(Kim et al., 2025)와 비교·검토하여 선체 및 해저 잠수 작업을 기준으로 표면 공급식 잠수의 효율성을 평가하고, 운영 및 관리 방안을 Part II에서 도출한다. 최종적으로 수중 작업의 특성에 적합한 잠수 방식을 선정하고, 이를 기반으로 보다 효과적인 수중 수색 및 구조 작업의 계획, 운영 및 관리 방안을 제시하고자 한다.

2. 표면 공급식 잠수

2.1 표면 공급식 잠수의 역사

초기 잠수 장비는 제한적인 공기 공급으로 인해 잠수사의 활동에 많은 제약이 있었다. 이러한 한계를 극복하기 위해 17세기부터 다양한 장치가 개발되기 시작했다. 특히, 17세기 후반 핼리(Halley)는 최초의 잠수 헬멧을 설계하였다. 이 헬멧은 대형 벨(Bell)에서 공기를 공급받아 호스를 통해 잠수사에게 전달하는 방식이었으나, 지속적인 공기 보충이 필요하다는 구조적 한계로 인해 장시간 수중 체류가 어려웠다(Sub Sea Systems, 2017).

1797년, 클링거(Klingert)는 잠수 헬멧과 복장을 설계하고, 표면에서 수중으로 연결되는 트윈 호흡 파이프 시스템을 개발하였다. 그러나 공기 공급 방식에 대한 구체적인 기록은 남아 있지 않다. 이후 1820년대에는 딘(Deane) 형제가 구리 재질의 초기 잠수 헬멧을 개발하였다. 이 헬멧은 원래 화재 진압 시 연기로부터 소방관을 보호하기 위한 용도로 설계되었으나, 이후 잠수 작업용으로 개량되었다. 딘 형제는 1828년 헬멧을 개선하여 잠수복 형태로 재설계하였으며, 이를 활용하여 선박 인양 작업에 성공적으로 적용하였다(Sub Sea Systems, 2017).

1830년대에 접어들면서 시브(Siebe)는 딘 형제의 설계를 기반으로 밀폐형 잠수복과 헬멧을 개발하였다. 시브의 설계는 헬멧과 전신 방수복을 완전히 밀폐하고, 표면 펌프를 통해 공기를 공급받는 시스템을 도입한 것이 특징이었다. 특히, 헬멧에 밸브를 추가하여 공기의 흐름을 조절할 수 있도록 한 점이 혁신적이었다. 이는 최초의 실질적인 기능을 갖춘 표면 공급식 잠수복으로 평가되며, 이후 현대 잠수 시스템의 기초가 되었다(Sub Sea Systems, 2017). 시브의 헬멧과 슈트를 활용한 다양한 실험과 연구를 통해 약 20 m(65.6 ft) 수심에서 성공적인 선박 인양 작업이 이루어졌다(Wikipedia, 2025).

20세기에 들어서면서 알루미늄과 같은 경량 소재가 잠수복

과 헬멧 설계에 도입되었다. 1911년, 맥더피(Macduffee)는 알루미늄 합금으로 제작된 약 250 kg(550 lb) 무게의 잠수복을 설계하였으며, 이 장비는 약 65 m(213 ft) 깊이에서 성공적으로 운용되었다(Sub Sea Systems, 2017). 이후 미 해군은 기존 Mark V 시스템(1916년 도입)을 현대화하기 위해 Mark 12라는 표면 공급식 잠수 시스템을 개발하였다. 이 시스템은 4년간의 개발과 3년간의 테스트를 거쳐 1985년에 공식 채택되었으며, 이전 모델인 Mark V에 비해 이동성과 유연성, 착용자의 편안함이 크게 개선되었다(NHHC, 2025).

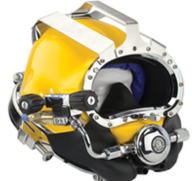
1968년에는 Desco사가 금속 소재의 자유 유동형 공기 공급 헬멧(Desco Air Hat)을 출시하였으며, 이는 얇은 수심 작업과 유해 물질이 포함된 환경에서의 다이빙 작업에서 널리 사용되었다(Sub Sea Systems, 2017). 또한, Kirby Morgan사

는 미 해군 실험 잠수대(NEDU; Navy Experimental Diving Unit)의 의뢰를 받아 SuperLite® 시리즈를 개발하였다. 이 중에 SuperLite® 17B 모델은 1975년에 출시되어 전 세계 군사 및 산업용 헬멧의 표준으로 자리 잡았다(NHHC, 2025). 현재, 우리나라에서도 해군, 해양경찰, 소방 및 산업용 잠수에서 Kirby Morgan 헬멧이 대표적으로 사용되고 있다.

2.2 표면 공급식 잠수 장비

표면 공급식 잠수 시스템은 육상에서 기체를 공급받아 잠수사에게 지속적이고 안정적인 호흡 기체를 제공하는 방식이다. 이 시스템의 주요 장점 중 하나는 감압 절차를 보다 정밀하게 수행할 수 있다는 점이다. 기체 공급이 제한되지 않기 때문에, 해저에서는 산소 중독과 질소 마취를 방지하기 위

Table 1. Detailed specifications and descriptions of SSDS equipment components

Component	Image	Specifications and Descriptions
High-Pressure Breathing Air Compressor	 Source: Bauer Compressor	- Converts ambient air into high-pressure breathing air using advanced filtration and drying - Compresses air to 200~300 bar (2,900~4,350 psi) for a steady supply - Engine-driven (gasoline/diesel or electric) for efficient, portable, continuous operation - Uses air-cooled or water-cooled systems to maintain performance under heavy loads
High-Pressure Gas Storage	 Source: Supagas	- Stores large volumes of gas at pressures up to 300 bar (4,350 psi) - Each cylinder has its own valve for independent pressure and gas type control - Made of durable aluminum or steel with corrosion-resistant coatings - Available as movable units (for vehicles or barges) or fixed installations (on support vessels, etc.)
Distribution Console	 Source: Amron International	- Central hub that regulates and directs high-pressure gas from storage to diving equipment - Maintains steady, safe pressure for consistent breathing air supply - Monitors gas flow in real time for secure operation - Interfaces between the high-pressure source and the diver's helmet or umbilical system
Umbilical	 Source: Novasub	- Multi-functional cable connecting the diver to the surface support system - Transmits breathing air, communication, power, and video signals if needed - Built with durable connectors to endure harsh underwater conditions - Customizable lengths (typically 30~300+ meters) for various operational needs
Diving Helmet	 Source: Kirby Morgan	- Provides a secure breathing environment with an automatic air supply regulator - Built from high-grade materials for protection against impacts, flooding, and high pressure - Ergonomically designed with adjustable fittings and a panoramic visor for clear vision - Compatible with communication systems and accessory mounts for diverse diving tasks

해 낮은 산소 및 질소 부분압의 기체를 선택하여 잠수할 수 있다. 또한, 감압 과정에서 산소 농도를 조절하여 감압 효율을 극대화할 수 있어 보다 체계적인 잠수 계획 수립이 가능하다(Tennessee Aquarium, 2020).

표면 공급식 잠수 시스템은 욕상과의 통신 시스템을 통해 수중 상황을 실시간으로 모니터링할 수 있으며, 비상 상황 발생 시 신속한 대응이 가능하다. 특히, 잠수 생명줄(Umbilical)이 욕상과 연결되어 있어 침몰선이나 복잡한 구조물 내부를

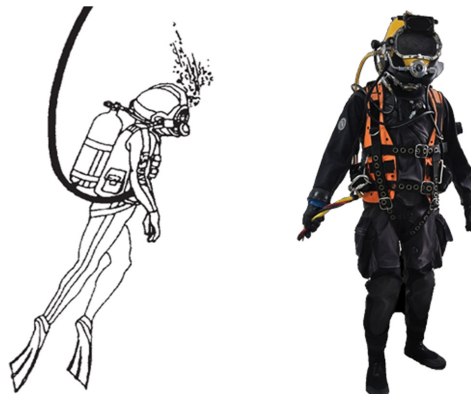
Table 2. Gas flow and component functions in SSDS diving

Step	Component	Function	Flow Direction
1	High-Pressure Breathing Air Compressor	• Compresses ambient air into high-pressure gas using advanced filtration and drying systems.	• Ambient Air → Compressor
2	High-Pressure Gas Storage	• Stores high-pressure gas in cylinders with individual valves for independent pressure and gas type control.	• Compressor → Gas Storage → Distribution Console
3	Distribution Console	• Regulates high-pressure gas to a safe, usable level for the diver and directs flow to the umbilical.	• Gas Storage → Distribution Console → Umbilical
4	Umbilical	• Transmits regulated gas from the distribution console to the diver underwater.	• Distribution Console → Umbilical
5	Diving Helmet	• Supplies the diver with breathable air through a controlled breathing system.	• Umbilical → Diving Helmet

Table 3. General characteristics of SSDS equipment (Adapted from U.S. Navy, 2018)

Gas Supply System	Surface Supply Method (semi-permanent)
Decompression Procedure	• No-decompression • In-water decompression on air • In-water decompression on air and oxygen • Surface decompression on oxygen
Principal Applications	• Search • Salvage • Inspection • Underwater ships husbandry and enclosed space diving
Advantages	• Unlimited by air supply • Head protection • Good horizontal mobility • Voice and/or line pull signal capabilities • Fast deployment
Disadvantages	• Limited mobility
Restrictions	• Depth limits: 190 fsw* (57.91 msw**) • Emergency air supply required deeper than 60 fsw (18.29 msw) or diving inside a wreck or enclosed space • Current: Above 1.5 knots (0.772 m/s) requires extra weights

Image



*Feet of seawater, **Meters of seawater

탐색할 때 출구를 잃을 위험을 줄여 잠수사의 심리적 안정성을 높인다(Wikipedia, 2017). 생명줄은 또한 통신 케이블을 포함하고 있어 잠수사와 지상 지원팀 간 명확하고 지속적인 의사소통이 가능하며, 이는 작업 효율성과 안전성을 높이는 데 중요한 역할을 한다(Substructure, 2020). 그러나 표면 공급식 잠수 시스템에는 다음과 같은 몇 가지 단점도 존재한다.

- 운영 인력: 스쿠버 잠수에 비해 상대적으로 더 많은 전문 인력이 요구되므로 단기적인 잠수 작업에서는 효율성이 낮아질 수 있다(Tennessee Aquarium, 2020).
- 전문적인 교육과 잠수 기술: 표면 공급식 잠수의 기체 관리 시스템은 1970년대에 개발된 이후 현재까지 사용되고 있으며, 수동식 운영 방식이 요구된다(Substructure, 2020). 이러한 특성으로 인해 장비 운영이 미숙하거나 관리가 부족할 경우, 치명적인 사고로 이어질 가능성이 있다. 따라서 기체 흐름도 및 장비 작동 방식에 대한 충분한 숙지가 필수적이다.
- 이동성의 제약: 장비의 무게와 생명줄 연결로 인해 이동성이 제한된다. 특정 위치에서는 장시간 잠수가 가능하지만, 넓은 지역을 탐색하는 작업에서는 효율성이 떨어질 수 있다(Wikipedia, 2017). 또한, 생명줄의 길이는 일반적으로 약 183m(600ft)를 초과하지 않으며, 이는 작업 범위를 제한하는 요소가 된다(Tennessee Aquarium, 2020).

Table 1과 2는 표면 공급식 장비의 기본 구성과 기체 흐름을 보여주며, 이는 표면 공급식 잠수 시스템의 주요 설비를 나타낸다. 필요에 따라 저압 컴프레서(Low-Pressure Compressor),

볼륨 탱크(Volume Tank), 비상 기체 공급 시스템(Emergency Gas Supply) 등의 추가적인 안전 장비를 구성할 수 있다(Substructure, 2020).

본 연구에서는 세월호 참사 현장에서 사용되었던 것과 동일한 표면 공급식 잠수 장비를 적용한다. 이 장비는 미 해군과 대한민국 해군에서 사용되는 시스템이며, U.S. Navy(2018)에서 제공하는 표면 공급식 잠수 시스템의 주요 특징은 Table 3과 같다.

3. 표면 공급식 잠수의 계획

3.1 잠수 가능 시간

Kim et al.(2023)이 예측한 세월호 침몰 지점의 조류 유속 시간 분포를 Fig. 1에 나타낸다. 이때 빨간색 실선은 표면 공급식 잠수 장비의 사용 한계 유속인 0.772 m/s (1.5 kn)를 의미한다. 이를 바탕으로, 세월호 침몰 지점의 예측 조위 변동과 표면 공급식 장비의 일일 사용 가능 시간(Diveable Time, DAT)을 각각 Fig. 2에 제시하였다. 여기서 일일 사용 가능 시간은 하루 동안 조류 유속이 0.772 m/s 이하인 총 시간을 의미한다. Fig. 2에서는 검은 실선이 조위를, 빨간색 원이 1일 사용 가능 시간을 나타낸다.

Fig. 1을 통해 하루 중 강한 조류(0.772 m/s 초과)가 발생하는 시기와 상대적으로 약한 조류(0.772 m/s 이하)가 발생하는 시기가 동시에 존재함을 확인할 수 있다. 하루 4회 정조(Slack Water) 시간대에는 조류가 약해져 표면 공급식 잠

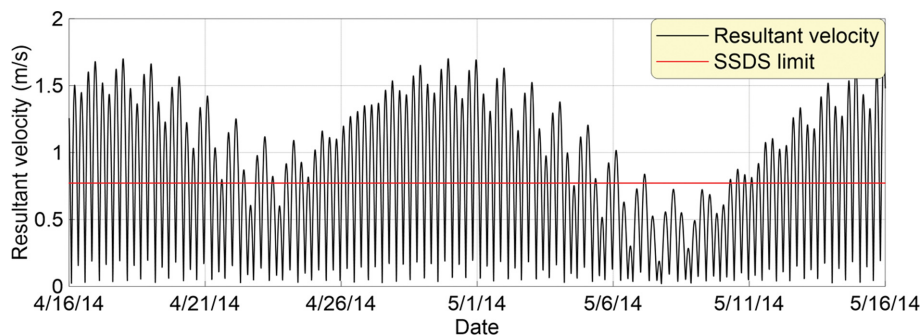


Fig. 1. Predicted time-domain current velocities at the Sewol ferry sinking site, including the SSDS equipment usage limit.

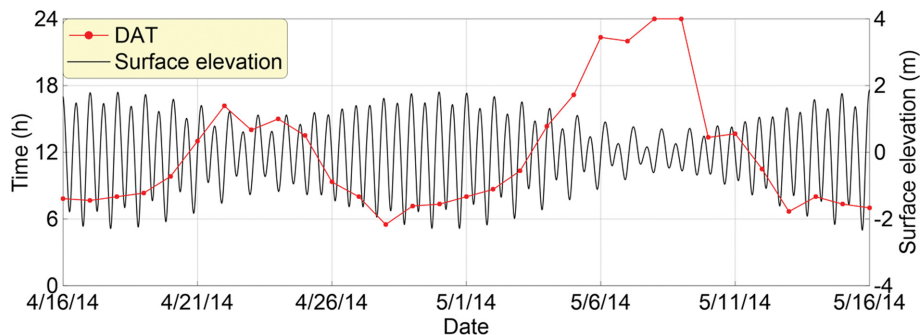


Fig. 2. Predicted time-domain tidal levels at the Sewol ferry sinking site, including the daily usable time for SSDS diving.

수가 가능하다. 특히, 소조기에는 조석 운동이 약해져 조류 유속이 감소함에 따라 표면 공급식 장비의 사용 가능 시간이 크게 늘어나, 24시간 잠수가 가능한 날도 발생한다. 반면, 대조기에는 강한 조류로 인해 사용 가능 시간이 크게 줄어드는 것을 Fig. 2에서 확인할 수 있다.

본 연구에서는 Kim et al.(2023)의 조류 예측과 잠수 가능 시간 분석을 바탕으로 구체적인 표면 공급식 잠수의 계획 및 운영 방안을 제시한다. 나아가 선행연구(Kim et al., 2025)에서 분석한 스쿠버 잠수와 비교하여 표면 공급식 잠수의 효율성을 평가 및 검토한다.

3.2 잠수 기준 및 절차

3.2.1 호흡 기체

표면 공급식 잠수에서 사용하는 호흡 기체는 스쿠버 잠수(Kim et al., 2025)에서 사용한 공기와 동일하다. 세월호 참사 현장을 대상으로 한 선행연구에서 수립한 선체 및 해저 잠수의 수심, 절대압, 그리고 질소 및 산소의 부분압 값은 Table 4에 제시되어 있다. 이러한 고압의 수중 환경에서 잠수사가 장시간 공기를 호흡할 경우, 산소 중독이나 질소 마취와 같은 잠수 질환에 노출될 위험이 있다.

질소 마취는 일반적으로 질소 부분압(PPN_2)이 3.2~4.0 ata를 초과할 때 본격적으로 나타나며, 4.0 ata 이상에서는 뚜렷한 증상이 나타날 가능성이 높다(Lippmann and Mitchell, 2005; Levett and Millar, 2008). 또한, 산소 중독은 산소 부분압(PPO_2)이 1.4 ata를 초과하면 위험이 증가하며, 1.6 ata를 초과하면 중추신경계(CNS; Central Nervous System)에 영향을 미칠 가능성이 커진다(Arieli et al., 2006; Wingelaar et al., 2017). 따라서 PPO_2 가 1.22 ata, PPN_2 가 4.53 ata인 수심 48 m의 해저잠수는 질소 마취의 위험이 높은 수준이나, 산소 중독은 높지 않은 정상적인 허용 가능한 범위($PPO_2 \leq 1.4$) 안에 있다. 수심 26 m의 선체 잠수는 PPO_2 와 PPN_2 가 각각 0.75 ata와 2.81 ata로, 질소 마취와 산소 중독의 위험성이 크지 않다.

이에 본 연구에서는 표면 공급식 잠수 시 잠수 질환 발생 확률을 최소화하기 위해 수중 공기 감압 잠수를 원칙으로 채택하고, VVal-79 알고리즘(Gerth and Doolette, 2012)을 활용하여 잠수 시간을 제한한다. 또한, 표면 공급식 잠수 중 질소 마취 및 산소 중독을 효과적으로 관리하기 위해 육상과 수중 간의 통신 체계를 기반으로 한 상호 모니터링 및 대응 전

략이 요구된다.

3.2.2 하강 및 상승 속도

표면 공급식 잠수에서 잠수사의 하강 및 상승 속도는 Kim et al.(2025)가 스쿠버 잠수에 적용한 경우와 같다. U.S. Navy(2018)의 잠수 매뉴얼에 따르면, 하강 속도는 22.86 m/min 이하, 상승 속도는 9.14 m/min 이하로 권장하고 있다.

본 연구의 표면 공급식 잠수에서는 감압 잠수가 적용된다. 이에 상승 시간은 각 감압 정지 지점 간 이동 시간을 포함하며, 첫 번째 감압 정지 이후부터 이전 감압 지점에서의 이동 시간을 기준으로 계산된다. 본 연구에서는 이 기준에 따라 하강 속도는 U.S. Navy(2018) 권고치인 22.86 m/min보다 느린 속도로 설정하여 안전성을 강화하였으며, 그 결과 선체 잠수는 약 2분, 해저 잠수는 약 3분의 하강 시간이 요구되는 것으로 나타났다.

상승 속도는 9.14 m/min 규정을 준수하며, 선체 잠수는 첫 감압 지점(수심 6 m)까지 약 2분 20초가 소요되고, 감압 정지 시간 14분과 마지막 수면 상승 시간 40초를 합산한다. 따라서 수심 26 m의 잠수사가 물 밖으로 나오기까지 총 17분이 걸린다. 그리고 수심 48 m의 해저 잠수의 경우, 첫 감압 지점까지 약 4분 20초, 9 m에서 2분, 6 m에서 10분의 감압 시간이 적용되며, 수면 상승 시간 40초를 포함하여 총 상승 시간이 17분으로 산정된다(Table 5). 이같이 설정은 하강 및 상승 속도는 잠수사의 폐와 조직 내 불활성 기체의 안전한 배출을 보장하고, 감압 정지 시간이 감압병 및 관련 위험을 예방하는 데 핵심적인 역할을 한다.

3.2.3 잠수 그룹

본 연구는 U.S. Navy(2018)의 잠수 절차를 준수하며, 짝잠수(Buddy Diving)를 기본 원칙으로 하여 표면 공급식 잠수 그룹을 7명으로 구성한다. 잠수사는 2인 1조로 수중 작업에 투입되며, 작업 완료 후 교대로 다음 조가 투입되는 방식으로 운영된다. 각 잠수 작업의 기본 인원은 잠수사 2명, 감독관 1명, 지원 요원 4명으로 구성되며, 이들의 역할은 다음과 같다.

- 감독관(Supervisor): 풍부한 경험과 자격을 갖춘 잠수사로, 잠수 절차, 행동 요령, 장비 점검 및 안전 사항을 총괄하며 작업 전반을 책임진다. 또한, 필요 시 잠수 기록 작성 업무도 수행한다.
- 잠수사(Diver): 일정 자격 요건을 충족한 국가 공인 잠수

Table 4. Partial pressures of oxygen and nitrogen in respiratory gases at different diving spots and depths

Spot	Depth (m)	Pressure (ata [*])	Partial Pressure (ata)	
			PPO_2	PPN_2
Hull	26	3.6	0.75	2.81
Seabed	48	5.8	1.22	4.53

* Atmospheric absolute (1 ata = 101.325 kPa)

Table 5. Descent and ascent rates and times of divers applied in this study

Spot	Depth (m)	Speed (m/min)		Time (min)	
		Descent	Ascent	Descent	Ascent
Hull	26	≤ 22.86	9.14	2	17
Seabed	48			3	17

자격을 보유한 인력으로, 수중 작업을 직접 수행한다. 이들은 잠수 절차, 하강 및 상승 속도, 해저 체류 시간, 수심 한계 등을 철저히 준수하며, 잠수 장비 및 수중 공구를 능숙하게 다룰 수 있어야 한다. 또한, 장비의 기본적인 수리 능력도 필수적으로 갖추어야 한다.

- 대기 잠수사(Standby Diver): 비상 상황 발생 시 즉각 투입될 준비가 되어 있어야 하며, 잠수 장비를 착용한 상태로 대기한다.
- 보조사(Diver Tender): 잠수사의 장비 착·탈을 지원하고, 수중 위치를 모니터링하며, 잠수사의 안전을 보조하는 역할을 수행한다.
- 기체 관리사(Console/Dynamic Positioning Operator): 잠수사에게 공급되는 호흡 기체를 관리하며, 수심에 맞춰 기체 공급 및 압력을 조절하고, 잔량을 지속적으로 확인한다. 또한, 잠수사의 호흡 기체 상태를 주기적으로 감독관에게 보고하여 작업이 안전하고 원활하게 진행될 수 있도록 지원한다.
- 대기 잠수사 보조사(Standby Diver Tender): 비상 상황 시 대기 잠수사의 신속한 투입을 돕고, 일반적인 상황에서는 기타 지원 업무를 수행한다.

이와 같은 그룹 구성과 역할 분담은 표면 공급식 잠수 작업의 효율성을 높이고 잠수사의 안전을 보장하며, 비상 상황에 신속하게 대응할 수 있도록 설계되었다. 일반적으로 지원요원의 교대에 대한 명확한 지침은 없지만, 현장 상황과 피로도를 고려하여 조정된다. 본 연구에서는 Kim et al.(2025)의 스쿠버 잠수와 동일하게 하루 약 4회의 정조 시간이 반복되는 6시간 12분 30초의 반조 주기(Half-Tidal Cycle)를 잠수 그룹의 교대 주기로 설정한다.

3.2.4 감압 기법

NEDU의 선임 장교 탈만(Thalmann)은 인적 자원을 활용

해 새로운 확률론적 감압 알고리즘을 도입했다. 이 알고리즘은 현재 미 해군 잠수 매뉴얼의 감압 테이블에 적용되고 있다. 전통적인 할데인 감압 이론(Haldane, 1908)을 바탕으로 발전한 미 해군의 워크맨 감압 이론은 무감압 한계 감압 테이블의 높은 신뢰성과 안전성을 입증했으나, 수심 15~55 m에서 적용된 감압 테이블에서는 감압병(Decompression Sickness, DCS) 발생 확률이 30~40%에 달하며, 정상적인 감압 절차를 준수한 잠수사에게서도 도플러 초음파 검사 결과 다량의 기포가 검출되었다.

이러한 문제를 해결하기 위해 기존 할데인 감압 이론의 EEM(Exponential-Exponential Model)을 대체하는 탈만의 ELM(Exponential-Linear Model)이 개발되었다(Thalmann, 2019). 탈만의 ELM은 감압병 발생이 95% 신뢰 수준에서 이항분포를 따른다고 가정하며, 감압병 발생률을 3.5% 미만으로 낮추는 보수적인 알고리즘이다.

이후 미 해군은 U.S. Navy(1957)의 기존 감압 테이블(United States Navy 1957 Decompression Tables) 조직 구획에 기체 장력 시간에 추가 1분을 더하는 방식으로 설계된 VVal-79 알고리즘을 발전시켰다. 이 알고리즘의 도입으로 무감압 한계 잠수에서 제2형 감압병(Type II DCS) 발생 확률이 0.2% 미만으로 감소했다(Vann et al., 2011). 또한, 미 해군 감압 알고리즘의 핵심인 감압병 발병 확률 이론에 기반하여 잠수 계획을 수립하고, Table 6에서 제1형 감압병(Type I DCS) 발생 확률을 확인할 수 있다(Gerth and Doolette, 2012). 이러한 알고리즘은 잠수사의 안전성을 크게 향상시키는 데 기여한다.

본 연구의 표면 공급식 잠수에서는 VVal-79 알고리즘에 따라 수중 공기 감압 15분을 고려하여 Table 7에 제시된 기준에 따라 잠수 계획을 수립한다. 이로써 수심 26 m와 48 m의 선체 및 해저 잠수에서는 잠수사의 안전을 위해 보수적인 감압 기준으로 각각 수심 27.4 m와 48.7 m를 고려한다. 그

Table 6. Estimated risks of decompression sickness for dive schedules in the VVal-79 air decompression table (Adapted from Gerth and Doolette, 2012)

Depth (m) / BT* (min)	Total Stop Time (min)	Air, 20 msw Last Allowed In-water Stop Percentage (Decompression Sickness)					
		Bubble Volume Measurement			Normalized Modified Risk Index: 98		
		%	Low	High	%	Low	High
27.4 / 40	14	2.367	1.771	3.099	2.180	1.630	2.857
48.7 / 15	12	2.334	1.694	3.134	1.900	1.383	2.550

*BT: Total elapsed time from surface departure until just before initiating ascent from the bottom

Table 7. VVal-79 air decompression parameters based on the Thalmann algorithm (Adapted from Gerth and Doolette, 2012)

Depth (m) / BT (min)	BT to 1st Stop (mm:ss)	Gas Mix	Decompression Stops (m)								Total Ascent Time (mm:ss)	Symbol Type
			27.4	24.4	21.3	18.3	15.2	12.2	9.1	6.1		
27.4 / 40	02:20	Air								14	17:00	L
		Air/O ₂								7	10:00	
48.7 / 15	04:20	Air							2	10	17:00	I
		Air/O ₂							1	6	12:00	

결과, 선체 및 해저 잠수의 체류 시간(입수부터 상승 전까지)은 각각 40분과 15분으로 결정된다.

3.2.5 단일 잠수 계획

U.S. Navy(2018)에 따르면 표면 공급식 잠수에서는 감압 잠수가 가능하다. 본 연구는 여러 감압 기법 중 수중 공기 감압 기법을 기준으로 하여 잠수 계획을 수립한다. 수중 공기 감압 시간은 15분 이내로 권장되며, 이 기준에 따라 감압을 고려한 선체 잠수와 해저 잠수의 프로파일을 각각 Fig. 3에 나타낸다.

단일 잠수는 체내 잔류 질소가 완전히 배출되어 PPN_2 이 대기 상태(약 0.78 ata)와 동일해진 상태에서 수행되는 단 한 번의 잠수를 의미한다. 이는 첫 잠수(First Dive)와 동일한 개념으로, 반복 잠수를 포함하지 않고 독립적인 1회의 잠수만을 대상으로 한다.

상대적으로 얕은 수심인 26 m에서 수행되는 선체 잠수의 경우, 체류 시간이 최대 40분, 감압 시간이 14분, 상승 시간이 3분으로 총 57분의 잠수 시간이 산정된다. 수중 감압 시간이 15분을 초과하지 않는 범위 내에서, 체류 시간 40분 중

하강 시간 2분을 제외하면 실제 수중 작업 시간은 38분이 확보된다. 반면, 수심이 48 m인 해저 잠수의 경우, 체류 시간이 최대 15분, 감압 시간이 12분, 상승 시간이 5분으로 총 32분의 잠수 시간이 제공된다. 실제 수중 작업에 사용할 수 있는 시간은 해저 체류 시간 15분 중 하강 시간 3분을 제외한 12분으로, 작업 시간이 상당히 제한된다. 따라서 총 잠수 시간은 선체 잠수가 25분 더 길고, 해저 잠수의 1.78배이다. 실질적인 수중 작업 시간은 선체 잠수가 26분 더 길고, 해저 잠수에 비해 3.17배이다.

잠수 작업을 마친 후 동일한 작업을 다시 수행하려면 재잠수(Reentry Dive)가 아닌 첫 잠수 조건을 충족해야 한다. 이를 위해 충분한 수면 휴식, 즉 재잠수 해제 시간(Surface Interval)이 필요하다. 첫 잠수 이후 체내 잔류 질소량은 U.S. Navy(2018)의 공기 감압 테이블(Fig. 4)에 A~Z 기호로 표시되며, Table 7처럼 선체 잠수는 L, 해저 잠수는 I를 각각 부여받는다. 따라서 선체 및 해저 잠수에 투입된 잠수사가 재투입되기 위해서는 각각의 재잠수 해제 시간 12시간 21분, 9시간 44분 이상의 수면 휴식이 철저하게 보장되어야 한다.

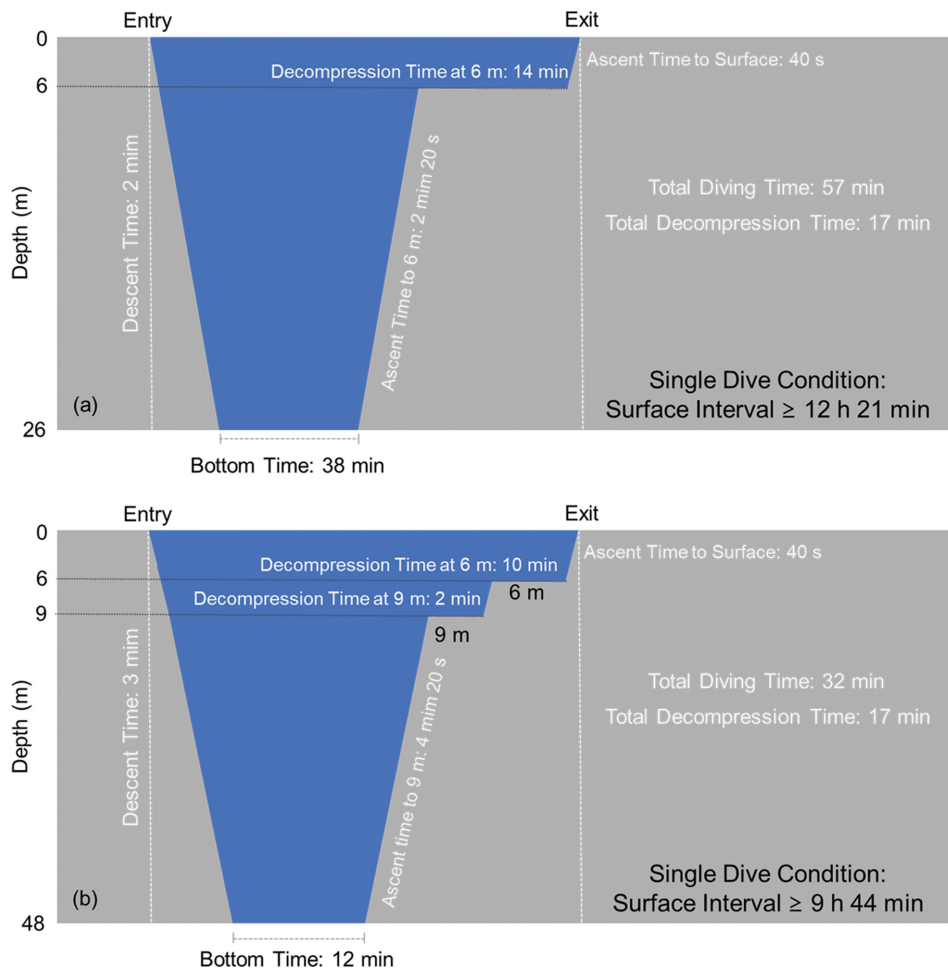


Fig. 3. Profile of in-water decompression for an air single dive at (a) hull diving and (b) seabed diving, including descent, bottom time, and ascent duration.

Table 10. Composition and deployment of personnel for hull diving during spring tides with strong currents

Date (DD/MM)	Time Range (hh:mm)	Surface Time (hh:mm)	Diveable Time (min)	Number of Dives	Personnel Deployment		
					Diver Team	Diver	Total
16/05	01:30~03:20	04:10	110	1	1	2	7
	07:30~09:20	03:50	110	1	1	2	7
	13:10~15:00	04:30	110	1	1	2	7
	19:30~21:00	05:10	90	1	1	2	7
Total			420	4	3	6	16

Table 11. Composition and deployment of personnel for hull diving during neap tides with weak currents

Date (DD/MM)	Time Range (hh:mm)	Surface Time (hh:mm)	Diveable Time (min)	Number of Dives	Personnel Deployment		
					Diver Team	Diver	Total
08/05	00:00~24:00	-	1,440	25	14	28	48
Total			1,440	25	14	28	48

Table 12. Composition and deployment of personnel for seabed diving during spring tides with strong currents

Date (DD/MM)	Time Range (hh:mm)	Surface Time (hh:mm)	Diveable Time (min)	Number of Dives	Personnel Deployment		
					Diver Team	Diver	Total
16/05	01:30~03:20	04:10	110	3	3	6	11
	07:30~09:20	03:50	110	3	3	6	11
	13:10~15:00	04:30	110	3	3	6	11
	19:30~21:00	05:10	90	2	2	4	9
Total			420	11	6	12	22

Table 13. Composition and deployment of personnel for seabed diving during neap tides with weak currents

Date (DD/MM)	Time Range (hh:mm)	Surface Time (hh:mm)	Diveable Time (min)	Number of Dives	Personnel Deployment		
					Diver Team	Diver	Total
08/05	00:00~24:00	-	1,440	45	20	40	60
Total			1,440	45	20	40	60

1회의 선체 잠수가 가능하므로, 원칙적으로 기본 그룹만 투입하면 된다. 1일 4회 잠수를 위해 4개 조의 잠수사가 필요하지만, 재잠수 해제 시간(12시간 21분)을 고려하면 1개 조가 재투입될 수 있다. 감독관과 운영 요원도 연속 투입 또는 재투입이 가능하므로, 대조기 조건에서는 하루 동안 감독관 2명, 운영 요원 8명, 대조기 잠수사 6명으로 구성된 총 16명의 인력이 요구된다.

24시간 동안 25회의 선체 잠수가 가능한 소조기 조건(2014년 5월 8일)에서는 재잠수 해제 시간을 고려하여 총 14개 잠수조(잠수사 28명)를 로테이션 방식으로 투입할 수 있다. 이에 따라 소조기 조건에서 1일 잠수 작업에는 6시간씩 투입되는 감독관 4명과 운영 요원 16명을 포함한 총 48명의 전문 인력이 요구된다.

3.4.2 해저 잠수

대조기 조건(2014년 5월 16일)에서는 해저 잠수가 2회 또는 3회 가능하므로 각 정조 시간마다 감독관 1명, 잠수사 4명 또는 6명, 운영 요원 4명이 필요하다. 이에 하루 동안 11

회의 해저 잠수를 위해, 반복 및 교체 투입되는 감독관 2명, 운영 요원 8명과 재잠수 해제 시간(9시간 44분)을 고려하여 로테이션으로 투입되는 잠수사 12명(6개 조)이 요구된다.

24시간 동안 45회의 해저 잠수가 가능한 소조기 조건(2014년 5월 8일)에서는 재잠수 해제 시간을 고려하여 총 40명의 잠수사(20개 조)가 순환 투입되며, 감독관 4명과 운영 요원 16명을 포함하여 총 60명의 전문 인력이 필요하다고 분석된다.

결과적으로, 조류의 강약에 따라 일일 잠수 가능 시간이 최대 3.43배 차이가 발생하며, 이로 인해 소조기 조건에서 대조기에 비해 선체 잠수 횟수는 약 6.25배, 해저 잠수 횟수는 약 4.1배 많아진다. 이에 따라 잠수에 요구되는 인력도 소조기 조건에서 대조기에 비해 선체 잠수는 약 3배, 해저 잠수는 약 2.73배 많다.

4. 결 론

본 연구(Part I)에서는 2014년 세월호 침몰 사고 현장을 고려한 조류 환경에서 표면 공급식 잠수를 안전하고 효율적

으로 수행하기 위한 이론적 계획을 검토하였다. 먼저, 표면 공급식 잠수의 역사와 장비 구성 및 감압 이론을 살펴본 뒤, 잠수사의 하강 및 상승 속도 설정, 잠수 그룹 편성하였다. 그리고 세월호 침몰해역의 수심(선체 잠수 26 m, 해저 잠수 48 m)을 고려한 감압 정지 시간을 포함한 단일 잠수 계획을 구성하였다. 이를 토대로 조류 조건에 부합하는 잠수 가능 횟수 및 투입 인력을 체계적으로 검토하여 표면 공급식 잠수의 계획을 수립하였다. 그 과정에서 미 해군 감압 알고리즘(VVal-79)을 적용하여 장시간 잠수가 필요한 안전성을 확보하였다.

스쿠버 잠수(Kim et al., 2025)와 비교하면, 표면 공급식 잠수는 감압 절차를 통해 심해에서도 더 긴 실질 작업 시간을 확보할 수 있다. 또한, 수면과 연결된 생명줄-음성 통신을 통해 잠수사의 안전성이 보장되고, 모니터링과 작업 지시가 가능하다는 점이 큰 장점이다. 반면, 장비 구성과 운영 인력이 더 많이 필요하고 초기 세팅 시간이 길어 긴급 대응 시 투입이 어려울 수 있으며, 선체 내부처럼 복잡한 환경에서는 기동성이 떨어지는 단점이 있다. 이러한 단점에도 불구하고, 표면 공급식 잠수는 대규모 해양 재난 현장에서 장시간 심해에서 수중 수색 및 구조 작업을 수행할 수 있는 매우 유용한 도구이다.

본 연구에서 제시한 표면 공급식 잠수의 최적 계획은 세월호 참사와 같은 고난도 수중 수색 및 구조 작업에 적용할 수 있는 기초 자료를 제공한다. 향후, 스쿠버 잠수와 표면 공급식 잠수뿐만 아니라 무인 탐사 장비(Lee et al., 2022; Jin et al., 2024)를 활용하여 보다 효과적인 수중 수색 및 구조 작업 전략을 수립할 필요가 있다. 또한, 수리 실험(Lee et al., 2024)과 수치 해석(Seo et al., 2022; Hwang et al., 2024)을 통해 해양 환경이 잠수사에게 미치는 영향을 면밀하게 조사하고, 인공지능(Kim and Lee, 2022)을 도입하여 보다 신속하고 정교한 잠수 계획을 수립할 필요가 있다. 이러한 기술로부터 우리는 해양 사고에서 신속한 수중 수색 및 구조를 통해 인명 보호할 수 있다.

이어지는 Part II(Lee et al., 2025)에서는 각각의 수심과 조류 조건 하에서 스쿠버 잠수 계획(Kim et al., 2025)과 정량적 비교를 통해 표면 공급식 잠수의 적용성과 효율성을 보다 구체적으로 평가할 것이다. 또한, 표면 공급식 잠수의 운영에서 요구되는 안전 대책과 관리 방안 등을 제시함으로써, 조류가 강한 해역에서 수중 수색 및 구조 활동을 한층 더 체계적으로 수행할 수 있는 토대를 마련하고자 한다.

감사의 글

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

References

- Arieli, R., Arieli, Y., Daskalovic, Y., Eynan, M. and Abramovich, A. (2006). CNS oxygen toxicity in closed-circuit diving: Signs and symptoms before loss of consciousness. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, 77(11), 1153-1157.
- Fan, S., Zhang, J., Blanco-Davis, E., Yang, Z. and Yan, X. (2020). Maritime accident prevention strategy formulation from a human factor perspective using Bayesian networks and TOP-SIS. *Ocean Engineering*, 210, 107-120.
- Gerth, W.A. and Doolette, D.J. (2012). VVal-79 maximum permissible tissue tension table for Thalmann algorithm support of air diving (NEDU TR 12-01). Panama City, FL: Navy Experimental Diving Unit. Retrieved from <https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/AD1215324.pdf>
- Haldane, J.S. (1908). The prevention of decompression sickness. *Journal of Physiology*, 38(2-3), 477-484.
- Hwang, T., Seo, S.C., Jin, H., Oh, H. and Lee, W.D. (2024). Effects of storm waves caused by Typhoon Bolaven (1215) on Korean coast: A comparative analysis with deepwater design waves. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 38(4), 149-163.
- 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.
- 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.
- Kim, T. and Lee, W.D. (2022). Review on applications of machine learning in coastal and ocean engineering. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 36(3), 194-210.
- 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., 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 II): Applicability evaluation and operational management strategies. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 37(2), 50-59 (in Korean).
- Lee, W.D., Kim, T., Kim, J., Kim, S.K., Oh, H. and Hwang, T. (2024). Experimental investigation on the drift and collision of containers induced by tsunami action on a wave absorbing revetment. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 38(5), 282-293.
- Levett, D.Z. and Millar, I.L. (2008). Bubble trouble: A review of diving physiology and disease. *Postgraduate Medical Journal*,

- 84, 571-578.
- Lippmann, J. and Mitchell, S. (2005). Nitrogen narcosis: Deeper into diving (2nd ed.). The Divers Alert Network.
- NHHC (2025). Equipment - Naval History and Heritage Command. Naval History and Heritage Command. Retrieved from <https://www.history.navy.mil/content/history/museums/undersea/explore/exhibits/online/nedu/equipment.html>
- 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.
- Seo, M., Yeom, G.S., Lee, C. and Lee, W.D. (2022). Numerical analyses on the formation, propagation, and deformation of landslide tsunami using LS-DYNA and NWT. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 36(1), 11-20.
- Seo, M.S. and Bae, S.J. (2002). The study on the analysis of marine accidents and preventive measures. *Journal of Fisheries and Marine Sciences Education*, 14(2), 123-134 (in Korean).
- Sub Sea Systems (2017). Our world: Diving helmet history. Retrieved from <https://subseasystems.blogspot.com/2017/10/diving-helmet-history.html>
- Substructure (2020). Surface-supplied diving. Retrieved from <https://www.substructure.com/about/marine-services-information/what-is-important-to-know-about-commercial-diving/surface-supplied-diving>
- Tennessee Aquarium (2020). Surface-supplied diver training manual. Retrieved from https://tnaqua.org/app/uploads/2020/06/Surface-Supplied_Manual.pdf
- Thalman, R. (2019). Development of the Exponential-Linear (EL) decompression model for safe diving. *Journal of Underwater and Hyperbaric Medicine*, 29(2), 123-130.
- U.S. Navy (1957). United States Navy 1957 decompression tables. U.S. Government Printing Office.
- U.S. Navy (2018). U.S. Navy diving manual (Rev. 7). Naval Sea Systems Command.
- Vann, R.D., Butler, F.K., Mitchell, S.J. and Moon, R.E. (2011). Decompression illness. *New England Journal of Medicine*, 364(14), 1365-1374.
- Wikipedia (2017). Surface-supplied diving equipment. Retrieved from https://en.wikipedia.org/wiki/Surface-supplied_diving_equipment
- Wikipedia (2025). History of scuba diving. Retrieved from https://en.wikipedia.org/wiki/History_of_scuba_diving
- Wingelaar, T.T., van Ooij, P.J.A.M. and van Hulst, R.A. (2017). Oxygen toxicity and special operations forces diving: Hidden and dangerous. *Frontiers in Psychology*, 8, 1263.

Received 15 February, 2025

1st Revised 30 March, 2025

2nd Revised 2 April, 2025

Accepted 3 April, 2025