

## 고위험 산업잠수 중대재해 예방을 위한 교육 및 자격관리 체계 개선 방안

김명훈 · 김태윤\* · 김연중\*\* · 홍성훈\*\*\* · 이우동†

경상국립대학교(연구원) · \*국립부경대학교(교수) · \*\*한국환경연구원(연구원) ·

\*\*\*한국수중환경안전협회(회장) · †경상국립대학교(교수)

## Improving Education and Certification Systems for the Prevention of Serious Accidents in High-Risk Commercial Diving

Myounghoon KIM · Taeyoon KIM\* · Yeonjoong KIM\*\* · Seonghoon HONG\*\*\* · Woo-Dong LEE†

Gyeongsang National University(researcher) · \*Pukyong National University(professor) ·

\*\*Korea Environment Institute(researcher) · \*\*\*Korea Underwater Environment Association(president) ·

†Gyeongsang National University(professor)

### Abstract

Commercial diving is a high-risk profession that requires advanced operational competence in pressurized underwater environments, real-time decision-making, and effective emergency response. However, the current diver certification system in Korea is constrained by its permanent licensing structure, limited role-based classification, and the absence of post-certification competency evaluation. This study analyzes these structural deficiencies through a comparative review of international frameworks, including IMCA, ADCI, and ADAS, which use various combinations of certification renewal and continuing-competence requirements, logbook-based experience verification, and periodic medical assessments. A conceptual application of the power law of forgetting illustrates how operational competence may decline without regular training, highlighting a limitation of a non-expiring certification model. To enhance diver safety and align the domestic system with global standards, a dynamic, renewal-based qualification framework should be adopted. The study further emphasizes the need for institutional capacity to support such reforms. In particular, public higher education institutions with specialized expertise in marine operations may be well-positioned to lead standardized, internationally aligned diver-training programs.

**Key words** : Commercial diving, Diver certification system, Certification renewal, Power law of forgetting, Serious accident prevention

### I. 서론

산업잠수는 해양 산업 현장에서 고압의 수중 환경 속에서 전문 장비를 활용하여 수행되는 복합 작업으로, 본질적으로 고위험군에 해당하는

특수작업으로 분류된다. 최근 발생한 대표적 사례로는 2025년 진해 지역 선박 클리닝 작업 중 발생한 산업잠수 사고를 들 수 있다. 해당 사고에서는 작업 시작 직후 잠수사 3명 중 2명이 사망하고 1명이 중상을 입었으며, 사고 원인은 일

† Corresponding author : 055-772-9126, wdlee@gnu.ac.kr

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

산화탄소 중독으로 확인되었다. 또한 감시인 미 배치, 비상 기체 미착용, 통신장비 미비 등 기본적인 안전관리 요소가 충분히 확보되지 않았던 것으로 보고되었다(Choi, 2025). 이와 같은 사례는 산업잠수 현장에서 장비, 인력, 감독 및 비상 대응 체계가 적절히 작동하지 않을 경우 중대재해로 이어질 수 있음을 보여준다.

국내 산업잠수 사고 사례를 분석한 선행연구에서도 이러한 위험성은 반복적으로 확인된다. 2003년부터 2022년 4월까지 국내 산업잠수 관련 사고로 인한 사망자는 총 61명으로 보고되었으며, 이는 산업잠수가 현장에서의 통제가 어려운 대표적인 고위험 작업 분야임을 보여준다(Kang, 2022). 특히 산업잠수 사고는 단일 원인에 의해 발생하기보다는 잠수사의 불안전 행동, 교육·훈련 부족, 장비 결함, 기체 공급 이상, 현장 감독 부재, 위험한 수중 환경 등이 복합적으로 작용하는 다요인적 특성을 지닌다. 따라서 산업잠수 중대재해 예방을 위해서는 개별 사고 원인에 대한 사후적 분석을 넘어, 위험 요인을 제도적으로 통제할 수 있는 교육 및 자격관리 체계의 구축이 필요하다.

최근 국내에서도 잠수사의 안전 확보와 수중 작업의 효율성 향상을 목적으로 다양한 연구가 수행되어 왔다(Lee et al., 2019a; 2019b; 2021; 2025b; 2025c; Lee, 2020; Kim et al., 2023; 2025a; 2025b). 예를 들어, 무감압 조건에서 수심별 잠수 작업의 효율성과 소요 인력을 분석하여 수심 증가에 따른 생산성 감소와 인력 부담 증가를 정량적으로 제시한 연구가 있으며(Lee et al., 2025a), 수중 수색 및 구조 현장에서의 원격무인잠수정(Remotely Operated Vehicle, ROV) 운용 전략과 유인 잠수 연계 운용의 적용 가능성도 제안되었다(Kim et al., 2025c; 2025d). 이러한 연구들은 산업잠수 및 수중 작업의 현장 적용성과 작업 효율성 향상에 기여하였다는 점에서 학문적·실무적 의의가 있다.

그러나 기존 연구는 주로 잠수 방식, 작업 가

능 시간, 장비 운용, 수중 작업 효율성 등 기술적·운용적 측면에 초점을 두고 있으며, 산업잠수 중대재해 예방을 위한 교육 및 자격관리 체계의 개선 방안을 구체적으로 제시한 연구는 상대적으로 부족한 실정이다. 선행연구에서는 국내 산업잠수 교육 및 자격관리 체계가 고위험 수중 작업 환경의 안전 요구를 충분히 반영하지 못하고 있으며, 자격의 영구성, 직무별 역할과 책임의 불분명성, 자격 유지 및 갱신 체계의 부재가 구조적 한계로 작용할 수 있음을 지적하였다(Kim et al., 2026).

국제 산업잠수 자격 체계는 이러한 문제를 통제하기 위해 자격의 유효기간 설정, 정기적 갱신, 로그북 기반 경력 검증, 신체검사, 잠수 감독관 제도 및 지속적 전문성 개발(Continuous Professional Development, CPD) 등을 활용하고 있다. 국제해양공사협회(International Marine Contractors Association, IMCA), 국제잠수공사협회(Association of Diving Contractors International, ADCI), 호주잠수사인증제도(Australian Diver Accreditation Scheme, ADAS)는 각각 세부 운영 방식에는 차이가 있으나, 자격을 단순한 취득 증명이 아니라 현재의 운용 가능 역량을 지속적으로 확인하는 제도적 수단으로 활용한다는 공통점을 가진다(Association of Diving Contractors International, 2011; Australian Diver Accreditation Scheme, 2024; International Marine Contractors Association, 2016). 이러한 국제 기준은 산업잠수 자격관리 체계가 중대재해 예방을 위한 핵심 안전관리 장치로 기능할 수 있음을 시사한다.

이에 본 연구는 선행연구(Kim et al., 2026)에서 제시한 국내 산업잠수 교육 및 자격관리 체계의 구조적 한계를 바탕으로, 고위험 산업잠수 중대재해 예방을 위한 자격관리 체계 개선 방안을 도출하는 것을 목적으로 한다. 특히 본 연구는 단순히 국내외 제도 차이를 반복적으로 비교하는 데 그치지 않고, 산업잠수 위험 요인과 자격관리 요소 간의 대응 관계를 분석하고, 망각의 역법칙(power law of forgetting)을 활용하여 자격 갱신

필요성을 개념적으로 검토하며, 국내 자격관리 체계 개편 방향을 단계적으로 제시하고자 한다. 이를 통해 산업잠수 자격관리 체계가 자격 취득 중심의 정적 제도에서 벗어나, 현장 위험 요인 통제와 현재 역량 검증을 중심으로 한 동적 안전 관리 체계로 전환될 필요성을 제시하고자 한다.

## II. 연구 방법

### 1. 연구 설계 및 분석 프레임워크

본 연구는 Kim et al.(2026)이 검토한 국내 산업잠수 교육 및 자격관리 체계의 구조적 한계를 주요 연구 전제로 설정하였다. 선행연구가 현행 제도의 구조적 한계를 진단하는 데 초점을 두었다면, 본 연구는 이를 바탕으로 고위험 산업잠수 현장에서 반복적으로 발생하는 중대재해의 주요 위험 요인을 식별하고, 국내 산업잠수 교육 및 자격관리 체계의 개선 방향을 도출하기 위해 문헌 기반 내용분석, 비교 제도 분석 및 정량적 모의분석을 순차적으로 적용하였다.

첫째, 기초자료 수집 및 위험 요인 식별 단계에서는 국내외 산업잠수 사고 분석자료, 재해 통계, 법령, 안전기준 및 선행연구를 검토하였다. 국내 자료는 한국산업안전보건공단의 잠수 작업 사고사망 분석자료와 관련 산업안전 기준을 중심으로 검토하였으며, 국외 자료는 미국 직업안전 위생국(Occupational Safety and Health Administration), 질병통제예방센터(Centers for Disease Control and Prevention), 영국 보건안전청(Health and Safety Executive) 및 국제 산업잠수 관련 보고서에서 제시한 사고 원인과 위험 요인을 참고하였다. 수집된 자료는 내용분석을 통해 사고 발생 원인, 기여요인, 작업환경 및 관리체계 미흡 요인을 추출하였으며, 이를 사고 발생 기전과 제도적 통제 가능성에 따라 인적 요인, 물리적·기술적 위험 요인 및 환경적 요인으로 범주화하였다.

둘째, 제도적 비교분석 단계에서는 식별된 위

험 요인이 국내 산업잠수 교육 및 자격관리 체계에서 어떻게 관리되고 있는지를 검토하였다. 이를 위해 국내 자격 체계와 국제적으로 활용되는 IMCA, ADCI, ADAS의 교육·인증·갱신 기준을 비교하였다. 비교 항목은 자격 부여 방식, 자격 등급별 역할과 책임, 현장경력 검증, 로그북 관리, 신체검사, 자격 갱신, 잠수 감독관 제도 및 지속적인 전문성 개발 체계로 설정하였다. 이러한 비교를 통해 국내 자격관리 체계가 고위험 수중 작업에서 요구되는 현행 역량 검증과 사후 안전관리 기능을 충분히 반영하고 있는지를 분석하였다.

셋째, 정량적 모의분석 단계에서는 자격 취득 이후 재교육 또는 실무 수행 공백이 잠수사의 운용 역량에 미칠 수 있는 영향을 검토하기 위해 인지과학 분야의 망각의 멍법칙(Power law of forgetting)을 준용하였다(Wickens, 1998). 본 분석은 실제 잠수사의 숙련도를 직접 측정한 것이 아니라, 반복 훈련과 자격 갱신이 부재할 경우 고위험 작업에 필요한 절차 기억, 상황 판단 및 비상 대응 역량이 시간 경과에 따라 저하될 수 있음을 설명하기 위한 개념적 모의분석으로 수행하였다. 이를 통해 연구 자격 구조의 한계를 검토하고, 주기적 자격 갱신과 지속적 역량 검증 체계 도입의 필요성을 제시하였다.

### 2. 문헌 고찰을 통한 산업잠수 위험 요인 식별

산업잠수는 수중이라는 특수한 환경에서 고압의 물리적 영향과 불확실한 환경 변수에 노출된 상태로 작업을 수행해야 하는 특성으로 인해, 본질적으로 높은 위험성을 내포한 작업에 해당한다. 미국 직업안전위생국은 산업잠수의 사망 위험이 타 산업군 대비 약 40배 높다고 분석하였으며(Woods, 2022), 영국 보건안전청의 통계에 따르면, 산업잠수 분야의 안전 사고율은 허용 불가능한 위험 기준인 1,000명당 1명 수준으로 나타났으며, 이는 건설업에 비해 약 12~24배 높은 사망 위험도에 해당하는 것으로 보고된 바 있다(Health

and Safety Executive, 2014).

또한, 미국 질병통제예방센터의 알래스카 잠수 사고 분석 결과(1990-1997)에 따르면, 특정 어업 잠수 분야에서는 안전 규제의 사각지대와 결합되어 현저히 높은 치명적 재해율이 나타난 것으로 보고되었다(Centers for Disease Control and Prevention, 1998). 이 분석에서는 잠수사고가 단일 원인보다 인적 오류, 기계적 결함, 환경적 변수 등이 복합적으로 작용하는 다요인적 특성을 지닌다는 점을 강조하였다.

이러한 다중 요인적 특성은 국내 사고 사례에서도 유사하게 나타난다(Kang, 2022). 산업잠수 사고의 주요 원인은 개별적 요인보다 인적·물리적·환경적 요인이 상호 복합적으로 작용한 결과로 분석되며, 이에 따라 각 위험 요소에 대한 구조적인 분류와 종합적인 분석이 요구된다.

### 3. 인적 요인

잠수 사고에서 인적 요인은 잠수사 개인의 불안정한 행동에 국한되지 않으며, 현장 관리자의 감독 부재와 조직 차원의 안전 문화 결여까지 포괄하는 개념으로 정의할 수 있다. 전체 사고의 약 44.7%가 작업자의 불안정한 행동에 기인한 것으로 나타났으며(Woods, 2022), 이는 잠수 사고에서 인적 요인이 차지하는 비중이 매우 크다는 점을 시사한다. 대표적인 사례로는 표준작업절차(standard operating procedure)의 미준수, 짝 잠수 원칙의 위반, 비상 상황 대응 능력 부족 등이 반복적으로 지적되고 있다.

주목할 점은 사고가 발생한 잠수사의 연령 및 경력 분포이다. Woods(2022)는 2002년부터 2014년까지 발생한 사망사고의 약 80%가 35-40세 연령대의 숙련된 잠수사에게서 발생하였으며, 평균 연령은 37세로 보고되었다. 이러한 결과는 잠수 사고의 원인이 단순한 훈련 부족이나 경험 미숙에 국한되지 않음을 의미한다. 즉, 장기간 근무로 인한 매너리즘, 위험 감수 성향의 증가, 안전 불

감증, 그리고 이를 방치한 조직 차원의 안전관리 소홀과 밀접한 관련이 있음을 보여준다. 또한, 정식 잠수 교육을 이수하지 않은 작업자가 단독으로 잠수를 수행하다가 비상 상황에 제대로 대응하지 못해 사고로 이어진 사례도 다수 보고되고 있어, 체계적인 교육·훈련의 미흡 역시 중대한 인적 위험 요인으로 작용하고 있음을 확인할 수 있다.

국내 산업잠수 사고 사례에 관한 선행연구에서도 이와 유사한 경향이 나타난다. Kang(2022)은 총 61건의 사고에서 사망 61명, 부상 2명 등 총 63명의 재해자가 발생하였으며 재해자는 모두 남성이었다. 이는 잠수 작업 종사자의 대부분이 남성으로 구성된 국내 산업 구조의 특성을 반영하는 결과로 해석된다. 연령별로는 30대가 17명(30.0%)으로 가장 많았고, 이어 40대 14명(22.2%), 20대 9명(15.9%) 순으로 나타났다. 잠수 경력별 분포는 5년 미만 7명, 5-10년 7명, 10-15년 4명, 15-20년 2명, 20년 이상 2명으로 나타나, 초급 잠수사뿐만 아니라 중·장기 경력자에게서도 사고가 지속적으로 발생하고 있음을 보여준다.

또한 Kang(2022)은 관리적 측면에서의 인적 요인도 잠수 사고의 주요 원인으로 지적하였다. 잠수 작업 관리자에 의한 현장 지휘·통제 부재, 사전 위험성 평가 미실시, 인증되지 않은 장비의 불법 사용 등은 사고 발생 가능성을 크게 높이는 요인으로 분류된다. 이는 개인 차원의 안전 의식만으로는 대응에 한계가 있으며, 조직 차원의 체계적인 관리·감독 및 제도적 통제가 병행되어야 함을 시사한다.

잠수 사고의 인적 요인은 개인의 불안정한 행동, 숙련 잠수사의 안전 불감증, 교육·훈련 부족, 관리·감독 체계의 미흡 등이 상호 복합적으로 작용한 결과로 해석된다. 따라서 산업잠수 사고를 예방하기 위해서는 개인·조직·제도 수준을 포괄하는 전방위적이고 통합적인 안전관리 전략이 요구된다.

#### 4. 물리적 · 기술적 위험 요인

잠수 사고에서 물리적 요인은 잠수 장비의 구조적 결함, 수중 환경의 압력 변화, 기체 공급 및 제어 시스템의 이상 등을 포함하는 개념으로 정의된다. 국내외 다수의 사고 분석 보고서에서는 이 중에서도 기체 공급 중단과 차압을 공통의 핵심 위험 요소로 지목하고 있다.

특히 차압은 수중 압력 분포의 비대칭으로 인해 발생하며, 잠수사의 생존 가능성을 급격히 저하시킬 수 있는 대표적인 물리적 위험 요인으로 평가된다. 수중 구조물에 잠수사가 흡착되어 자력으로 이탈이 불가능해지는 사고 형태는 치명적인 결과로 이어질 수 있으며, 실제로 반복적으로 보고된 바 있다(Woods, 2022; Centers for Disease Control and Prevention, 1998). 댐, 수문, 취·배수구와 같은 수중 구조물 인근에서는 강력한 흡입압이 형성될 수 있으며, 이러한 조건은 작업자의 순식간 흡착 및 기체 공급 차단으로 이어지는 고위험 환경을 조성한다. 특히, 안전성이 검증된 나사식 피팅 대신 분리가 용이한 퀵 릴리즈 방식의 연결부를 사용하거나, 주 기체 공급 중단 상황에 대비한 비상 기체 시스템을 미착용한 경우, 차압 환경에서의 생존 가능성은 현저히 낮아지며 이는 사망의 직접적인 원인으로 작용할 수 있다.

한편, 수중에서의 급격한 압력 변화는 잠수사의 생리적 안정성을 심각하게 저해한다. 과도한 압력 변화는 감압병, 동맥 가스 색전증, 기흉 등 다양한 형태의 압력 손상을 유발할 수 있으며, 이는 잠수사의 생명을 위협하거나 영구적인 신체 손상으로 이어질 수 있다. 이외에도, 수중 용접 중 발생할 수 있는 폭발, 중량물 취급 중의 협착, 프로펠러 등 선박 장비와의 충돌 역시 산업잠수 현장에서 지속적으로 보고되는 주요 물리적 위험 요인이다.

국내 사례를 살펴보면, 잠수사 사망사고의 가장 빈번한 원인은 공기 공급 시스템의 결함으로 나타났다(Kang, 2022). 주요 사례로는 컴프레서의

작동 중단, 공기 호스의 꼬임 또는 절단, 잔압 확인 미흡에 따른 기체 고갈 등이 있으며, 이는 반복적으로 보고되어 왔다. 이러한 결과는 기체 공급 시스템의 이중화 및 신뢰성 확보, 정기적 장비 점검과 유지관리의 체계화가 잠수 사고 예방에 있어 핵심적인 요소임을 시사한다.

요약하면, 산업잠수에서의 물리적 위험은 장비 결함, 기체 공급 시스템의 신뢰성 부족, 차압과 같은 수중 환경 특유의 위험, 그리고 압력 변화로 인한 생리적 손상이 상호 복합적으로 작용한 결과로 해석된다. 따라서 사고 예방을 위해서는 잠수 장비의 구조적 안전성 확보, 기체 공급 시스템의 이중화 및 비상 대응 체계 구축, 차압 발생 위험 구역의 사전 식별 및 접근 통제 등 기술적·운영적 대책이 반드시 병행되어야 한다.

#### 5. 환경적 요인

잠수 사고에서 환경적 요인은 작업이 수행되는 수중 공간의 자연적·지리적 특성에 기인하여, 잠수사의 안전에 영향을 미치는 외부 조건 전반을 의미한다. 해양 및 내수면에서 수행되는 잠수 작업은 조류, 파랑, 수온, 수중 시야 등 다양한 환경 변수가 복합적으로 작용하며, 이들 요소는 시·공간적으로 변동성이 크다는 점에서 사전 예측과 통제가 어려운 고위험 조건을 형성한다. 이러한 특성으로 인해, 환경적 요인은 잠수 사고의 주요 위험 요인으로 작용한다.

국제 산업잠수 관련 보고서들은 파이프라인 내부, 수중 구조물의 밀폐 공간 등 폐쇄된 수중 환경을 대표적인 환경적 위험 요소로 지적한다. 이들 공간에서는 잠수사의 이동이 제한되고, 비상 상황 발생 시 신속한 이탈이 곤란해지는 조건이 형성된다. 동시에 기체 공급 장치 또는 호흡 호스의 얽힘 위험이 증가하여, 생존 가능성이 저하되는 구조적 위험도 동반된다. 아울러 낮은 수온은 저체온증을 유발하여 잠수사의 인지능력과 판단력을 저하시킬 뿐 아니라, 근력 저하 및 반응

시간 지연을 초래함으로써 사고 가능성을 현저히 증가시키는 요인으로 작용한다.

또한, 수중에 분포한 해초류, 폐어구, 로프 등은 잠수사의 이동 경로를 물리적으로 방해하고, 호흡 호스 또는 안전 로프를 얽히게 하여 질식 사고로 이어질 수 있는 대표적인 환경 요인으로 보고된다(Woods, 2022). 이러한 위험은 특히 수중 탁도가 높은 혼탁한 환경에서 더욱 증폭되며, 장애물 인지 지연으로 인해 회피 행동이 제한되는 특성을 보인다.

국내 산업잠수 사례에서도 환경적 요인의 영향은 명확히 드러난다. 높은 파고와 강한 조류는 잠수사의 자세 제어를 어렵게 하고, 지속적인 체력 소모를 유발하여 작업 효율을 저하시키는 동시에, 사고 발생 가능성을 증가시키는 대표적인 환경적 위험 요소로 작용한다. 더불어, 혼탁한 수중 시야는 그물, 로프, 양식장 시설물 등과 같은 수중 장애물의 사전 인지를 어렵게 하여 얽힘 및 질식 사고를 유발하며, 이는 국내 양식장 잠수 작업에서 반복적으로 보고되는 주요 사망 원인 중 하나이다(Kang, 2022).

이와 같은 환경적 요인은 단독으로 사고를 유발하기보다는, 장비 오작동이나 잠수사의 인적 오류를 증폭시키는 촉매적 역할을 수행한다. 즉, 불리한 환경 조건은 잠수 장비의 성능 한계를 노출시키고, 잠수사의 판단 오류 및 대응 지연을 유발함으로써 사고 발생 가능성과 결과의 치명성을 동시에 증가시킨다. 따라서 잠수 사고 예방을 위해서는 사전 환경 평가와 작업 적합성 검토, 실시간 수중 환경 모니터링, 환경 조건 악화 시 작업 중단을 포함한 보수적 의사결정 체계의 확립이 필수적이다.

### Ⅲ. 연구 결과

본 연구는 고위험 산업잠수 분야의 중대재해 예방을 목적으로 수행된 선행 연구 결과를 바탕으로 국내외 산업잠수 교육 및 자격관리 체계를

자격관리 요소별로 비교·분석하였다(Kim et al., 2026). 이를 통해 현행 제도의 구조적 한계를 도출하고, 산업잠수 작업 특성을 반영한 안전관리 체계 개선 방안을 제시하였다.

#### 1. 산업잠수 교육 품질 관리 및 자격 기관

산업잠수사의 직무 수행 역량은 교육 과정의 질적 수준에 의해 좌우되며, 이를 관리·감독하는 자격 체계의 구조와 운용 방식에 따라 교육의 실효성은 크게 달라진다. 특히 산업잠수는 고위험 작업 특성을 지니고 있어, 교육 내용의 표준화뿐만 아니라 교육기관 자체에 대한 지속적인 품질 관리와 산업 현장과의 연계성 확보가 핵심 요소로 작용한다. 이러한 관점에서 국내와 국외의 산업잠수 교육·자격 체계는 관리 주체의 권한 구조, 평가 방식, 그리고 산업 현장과의 연계 수준 측면에서 근본적인 차이를 보인다.

##### 가. 국내 교육 체계의 운영 특성

국내의 산업잠수 교육은 국가직무능력표준(National Competency Standards, NCS)에 기반한 교육 커리큘럼을 중심으로 운영되며, 직무 수행에 필요한 능력 단위를 정의하고 교육 내용의 최소 기준을 제시한다는 점에서 일정 수준의 표준화 기능을 수행하고 있다. 그러나 이는 교육 과정의 형식적 구성에 초점이 맞추어져 있을 뿐, 교육기관의 실질적인 교육 품질을 지속적으로 검증하고 관리하는 체계로는 미흡한 한계를 보인다.

교육기관의 자격 부여는 직업능력심사평가원을 중심으로, 기관의 재정 건전성, 준법성, 운영 안정성 등을 평가하고 현장 점검을 통해 이루어진다.

이러한 평가는 행정적 운영 요건을 확인하는 데에는 일정한 효과가 있으나, 산업잠수 교육에 필수적인 핵심 안전 및 기술 요소, 예컨대 교육 장비의 작동 상태, 강사진의 현장 실무 경험, 교육생 수에 비례한 장비 확보 수준 등에 대해 정량적·정성적인 관점에서 종합적인 질적 평가를

수행하기에는 구조적인 한계를 지닌다.

그 결과, 한국산업인력공단에서 자격을 취득한 잠수사라 하더라도 교육기관 간 교육 환경 및 훈련 강도의 차이로 인해, 현장에 요구되는 안전 수칙 준수 능력이나 비상 대응 역량에 있어 편차가 크게 발생하고 있다는 지적이 있다. 또한, 국내 교육은 실기 위주의 단기 집중 과정이 많아, 고위험 잠수 작업에 필요한 상황 인지 능력과 종합적 숙련도 축적이라는 교육 본연의 목표 달성에 구조적 제약이 존재한다.

이로 인해 교육은 자격 취득을 위한 형식적 절차로 인식되는 경향이 강해지며, 실제 산업 현장의 위험 요소와 작업 조건을 충분히 반영하지 못하고 있다는 지적이 제기되고 있다.

#### 나. 국외 인증 기반 교육 체계의 특성

국제 기준을 채택하고 있는 주요 국가들은 명확한 권한과 책임을 지닌 인증 기구를 중심으로 산업잠수 교육 체계를 운영하고 있다. IMCA, ADCI 및 ADAS는 운영 주체와 인증 범위에서 차이가 있다. IMCA는 인정 자격체계와 일부 전문 직무의 교육·인증체도를 운영하고, ADCI는 협회 기반 인증카드 제도를, ADAS는 국가 차원의 직업잠수 교육·인증체계를 운영한다.

이들 인증 기구는 정기적이고 체계적인 현장 감사를 통해 교육기관의 시설·장비 상태, 장비 유지보수 체계, 강사의 자격·경력, 교육생 평가 시스템 등을 종합적으로 점검한다. 기준 미달 시에는 시정조치 요구에 그치지 않고, 인가 취소까지 가능하도록 제도화되어 있어 교육 품질에 대한 통제와 책임성이 강력하게 확보된다.

무엇보다, 국외 인증 체계는 자격 취득 이후에도 로그북 기록, 정기적 건강검진, 실무 경험 검증 등을 통해 잠수사의 실무 역량을 지속적으로 관리한다는 점에서 차별된다. 이는 자격을 일회성 면허가 아닌 ‘현재 운용 가능 역량’을 증명하는 실질적 안전 인증 체계로 기능하게 한다. 또한, 인증 기구는 자격을 산업현장 및 발주기관과

연계하여, 자격 보유자가 별도의 검증 절차 없이도 국제 산업현장에 즉시 투입될 수 있도록 구조화되어 있다.

이와 같은 국외 교육·자격 체계는 교육, 인증, 현장이 유기적으로 연계된 폐쇄형 품질관리 시스템을 형성하며, 결과적으로 산업잠수의 안전성과 신뢰성을 제도적으로 확보하는 기반으로 작용한다.

## 2. 자격 등급별 직무 역할 및 책임 범위 비교

### 가. 국내 자격 체계의 구조적 한계

산업잠수 작업은 작업 수심의 증가, 호흡 기체의 변화, 그리고 사용 장비의 복잡성에 따라 위험도가 선형이 아닌 비선형적으로 증대되는 특성을 지닌다. 이러한 특성으로 인해 국제 산업잠수 분야에서는 자격 등급에 따라 잠수사의 역할과 책임을 명확히 구분하고, 각 등급별로 허용되는 작업 범위와 한계를 제도적으로 엄격히 규정하고 있다. 즉, 자격 등급은 단순한 숙련도의 표시가 아니라, 특정 조건에서 안전하게 임무를 수행할 수 있는지를 판단하는 핵심적인 안전관리 수단으로 기능한다.

반면, 국내 산업잠수 자격 체계는 한국산업인력공단에서 운영하는 잠수기능사, 잠수산업기사, 잠수기능장으로 구분되어 있으나, 이들은 학력 또는 경력 요건에 근거한 행정적 분류에 초점이 맞추어져 있어 실제 잠수 현장의 위험 요소와 운용 조건을 반영하는 기술적 차별성이 부족하다. 특히 등급 간에 운용 가능한 수심, 사용 장비의 종류, 적용 가능한 호흡 기체, 그리고 현장에서의 역할 및 책임 범위에 대한 기술적 제약이나 법적 구분이 명확히 설정되어 있지 않다.

이로 인해 실제 산업 현장에서는 자격 등급에 상관없이 동일한 수준의 작업이 수행되는 사례가 빈번하며, 상위 자격 보유자가 고위험 작업을 전담하거나 책임지는 구조도 제도적으로 정착되어 있지 않다. 결과적으로 국내 자격 체계는 숙련도와 위험도를 연계한 안전관리 수단으로서의 기능

이 미흡하다는 평가를 받고 있다(Kim et al., 2026).

특히, 한국산업인력공단의 자격정보에 따르면, 잠수기능사와 잠수산업기사 간의 직무 정의는 명확한 기술적 구분 없이 유사한 내용으로 제시되어 있다. 또한, 2017년에 신설된 잠수기능장 자격은 “산업잠수에 관한 최상급 숙련 기능을 바탕으로 산업 현장에서 공정관리, 소속 기능 인력의 지도 및 감독, 현장훈련, 경영자와 기능 인력을 연계하는 현장관리자의 역할을 수행한다”고 정의되어 있으며, 관리·지도·훈련 등 조직 관리적 측면에 치중된 역할을 포괄적으로 부여하고 있다. 그러나 해당 정의는 수중 작업의 위험도나 기술 복잡성에 따라 실질적인 작업 수행 권한이 어떻게 달라지는지를 반영하지 못하고 있다.

이러한 자격 체계의 한계는 고위험 산업잠수 환경에서 역할과 책임의 경계를 모호하게 하며, 사고 발생 시 책임 소재가 불명확해지는 구조를 초래할 수 있다. 따라서 국내 자격 체계는 기존의 행정 중심 등급 구분을 넘어, 작업 수심, 호흡 기체 종류, 잠수 방식, 사용 장비, 그리고 비상 대응 책임 등 작업 기술 요소를 기반으로 한 역할 중심의 자격 구조로 전환될 필요가 있다. 이는 단순한 자격 체계 개편을 넘어 산업잠수의 구조적 안전 확보를 위한 필수적인 제도적 조건이라 할 수 있다.

#### 나. 국제 자격 체계의 역할 분화 구조

국제 산업잠수 자격 체계는 잠수사의 학력이나 경력 기간과 같은 형식적 기준이 아니라 실제 수행 작업의 위험도와 기술적 요구 수준을 기반으로 자격을 구조화하고 있다. 수심, 호흡 기체, 잠수 방식, 사용 장비의 종류에 따라 작업 위험도는 크게 달라지며, 이들 변수에 따라 자격 등급별 수행 가능 작업이 정량적이고 기술적으로 제한된다.

IMCA, ADCI, ADAS 등 국제 주요 인증 기관은 자격 등급을 단계별로 구분하고, 각 등급에 대해 허용 가능한 최대 수심, 적용 호흡 기체, 사

용 장비, 수행 작업의 성격 등을 명확하게 규정하고 있다. 이러한 등급 구조는 하위 등급에서 로그북 기반의 충분한 현장 경력을 축적한 후에만 상위 등급으로의 교육과 시험 응시를 허용한다. 이는 단기 교육이나 형식적 요건 충족만으로 고위험 작업에 접근할 수 있는 국내 체계와 뚜렷한 대조를 이룬다.

또한, 국제 자격 체계는 잠수사 개인의 자격뿐 아니라 잠수 감독관, 생명유지장치 운영자, 기압 조절실 운용자, ROV 운용 인력 등 지원 인력의 직무도 독립적인 전문 직무로 인정하고 별도 교육과 자격을 요구한다. 이러한 역할 분화 구조는 각 인력이 고유한 책임과 권한을 명확히 수행할 수 있도록 하며, 복합적인 잠수 현장에서 신속하고 일관된 대응 체계를 보장한다.

결과적으로, 국제 자격 체계에서는 자격 등급이 곧 현장에서의 작업 가능 범위와 직무 책임 수준을 의미하며, 이는 산업 현장에서 실질적이고 실효성 있는 안전관리 수단으로 기능한다. 반면, 국내 자격 체계는 자격 등급 간의 기술적 차별성이 미흡하고 현장 운용과의 연계성이 부족하여, 자격 체계가 실질적인 안전관리 체계로 기능하는 데 한계가 존재한다.

### 3. 자격 취득 후 관리 체계 비교

국내 산업잠수 분야의 국가기술자격은 자격 취득 과정에서의 검증 절차는 마련되어 있으나, 자격 취득 이후 역량의 유지와 검증을 위한 체계적인 관리 제도는 미비한 실정이다. 특히, 기술의 발전과 안전 기준의 변화에도 불구하고 자격 갱신 제도가 부재하고, 신체적 조건만을 중심으로 한 현장 투입 기준은 산업잠수사의 실질적인 안전 역량을 담보하지 못하는 구조적 문제점으로 지적된다.

현재 「국가기술자격법」에 의거하여 발급되는 잠수기능사 및 잠수산업기사는 유효기간 없이 영구 자격으로 부여되고 있다. 이는 의료인, 항공

종사자, 혹은 해외 선진국의 산업잠수 자격처럼 정기적인 보수교육과 자격 갱신을 통해 직무 수행 능력을 재검증하는 제도와는 명확히 대조된다. 이러한 제도적 공백으로 인해, 자격을 취득한 후 수십 년간 현장 경험이 없거나 최신 잠수장비 및 안전 절차에 대한 지식이 단절된 인력일지라도 법적으로는 자격의 유효성이 그대로 유지된다. 즉, 과거의 기술 수준에 머물러 있는 자격 소지자가 아무런 재교육 없이 고위험 잠수 현장에 즉시 투입될 수 있는 구조가 형성되어 있으며, 이는 잠수팀 전체의 안전을 위협하는 중대한 리스크로 작용할 수 있다.

자격 취득 이후 잠수사의 현재 역량을 주기적으로 재검증하는 제도적 장치는 제한적이며, 현장 투입 시에는 주로 의학적 적합성이 확인된다. 한국산업안전보건공단의 「잠수작업자 보건관리 지침」에 따르면, 잠수 작업자는 고기압 환경에서의 신체적 적응성을 확인하기 위해 배치 전 건강진단, 특수건강진단, 수시건강진단 등을 받아야 한다. 해당 지침은 고막 및 부비동의 압력 손상 여부, 심혈관계 및 호흡기 계통의 고압 노출에 따른 생리학적 부적합성을 선별하는 데 목적을 둔다.

그러나 이러한 신체검사는 잠수사의 건강 상태만을 판별할 뿐, 실제 작업 수행 능력이나 비상 상황 대처 역량을 보장하지 않는다. 자격 취득 후 수십 년이 경과한 고령의 잠수사나 경력 단절자라도 신체검사만 통과하면 현장에 합법적으로 투입될 수 있는 현행 구조는 심각한 제도적 취약성으로 지적된다.

이러한 영구 자격 제도는 행정적 편의성을 확보할 수 있으나, 고위험 작업에 종사하는 산업잠수사의 특성을 고려할 때 다음과 같은 구조적 안전관리 공백을 초래한다.

- 실무 역량 검증의 부재 : 자격 취득 후 장기간 현장을 떠났던 인력도 별도 재교육이나 역량 검증 없이 고위험 작업에 투입될 수 있다. 그

러나 잠수사의 생리적 적응 능력, 상황 인지력, 비상 대응 역량은 반복 훈련과 실무 경험이 동반되지 않으면 급격히 저하되는 특성을 지닌다.

- 자격 유효성과 신체 적합성의 연계 부재 : 현행 제도에서는 신체검사 결과가 자격의 유효성과 연동되지 않기 때문에, 의학적으로 잠수 부적합 판정을 받은 경우에도 자격은 유지된다. 이는 현장 지휘체계 내 감독관의 판단과 안전 통제 권한을 약화시키는 요인으로 작용할 수 있다.
- 최신 기술 및 안전 기준 반영의 미비 : 장비, 감압절차, 관련 규정 등은 기술 발전과 사고 분석 결과에 따라 지속적으로 변화하나, 국내 자격 체계는 이를 반영할 수 있는 재교육이나 재인증 체계를 갖추지 못하고 있다.

반면, 국제 산업잠수 표준을 운영하는 주요 인증 기구들은 자격을 단순한 면허가 아닌 ‘현재 운용 가능 역량’을 보증하는 제도적 수단으로 규정하고 있다. 미국 ADCI와 호주 ADAS는 자격 유효기간을 통상 5년으로 제한하며, 갱신 시 최근 잠수 경력 제출을 의무화하고 있다. 기준 미충족 시 보수 교육 이수나 자격 정지가 적용된다. 또한, 로그북은 자격 유지를 위한 핵심 자료로 활용된다. 감독관 서명이 포함된 로그북은 실제 잠수 횟수, 체류 시간, 작업 조건 등을 객관적으로 검증하며, 이는 단순한 서류상의 자격 보유 여부가 아닌 실질적 수행 능력의 근거로 기능한다.

마지막으로, 신체검사 결과와 자격 효력의 직접 연동이 제도화되어 있다. 국제 산업잠수 기준은 현장 잠수업무 수행 시 유효한 신체 적합성 검사서를 요구한다. 특히 ADAS는 자격의 잠수업무 유효성을 현행 직업잠수 신체검사와 직접 연계하고 있다. 이처럼 신체 적합성과 자격 유효성을 연계하는 제도는 산업잠수 작업의 안전성을 구조적으로 확보하는 핵심 수단으로 기능하고 있다.

#### 4. 자격관리 체계 개선 방안

본 연구는 국내 산업잠수 교육 및 자격 체계를 국제 기준과 비교·분석함으로써, 현행 제도가 산업 현장의 고위험 특성을 충분히 반영하지 못하고 있음을 확인하였다. 특히, 자격의 영구성, 역할 분화의 미흡, 자격 유지 및 관리 체계의 부재는 인적 재해 발생 가능성을 구조적으로 증폭시키는 요인으로 작용한다. 이에 본 장에서는 인적 재해 예방의 관점에서 자격 갱신 제도의 필요성을 개념적 모의분석을 통해 고찰하고, 국내 산업잠수 자격 체계 개선의 산업적 의미를 중심으로 논의한다.

##### 가. 자격 갱신 제도의 필요성

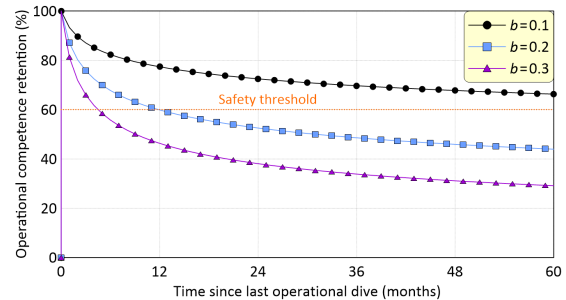
산업잠수 사고에는 작업자의 판단 오류, 위험 인식 부족, 비상 상황에서의 대응 미숙과 같은 인적 요인이 크게 기여한다. 이는 수중 작업이라는 특성상 제한된 시야와 시간 압박, 고압 환경으로 인한 생리적 부담이 복합적으로 작용하기 때문이다. 그럼에도 불구하고, 국내 산업잠수 자격은 일단 취득하면 별도의 갱신 절차 없이 평생 유효한 구조를 유지하고 있어, 잠수사의 실제 현장 경험과 현재 역량 간의 격차를 제도적으로 통제하지 못하는 실정이다.

본 연구에서는 잠수사의 역량 감퇴 경향을 설명하기 위해, 인지과학 및 신뢰성 공학 분야에서 검증된 망각의 멱법칙을 산업잠수의 특성에 준용하였다(Wickens, 1998). 산업잠수는 고도의 절차 기억과 상황 인식, 비상 대응 판단을 요구하는 고위험 전문 작업이라는 점에서, 기술 숙련도 저하를 설명하는 개념적 모델로 해당 법칙의 적용이 적절하다.

$$P(t) = a(1 + \gamma t)^{-b} \dots\dots\dots (1)$$

여기서  $P(t)$ 는 비활동 기간에서의 운용 역량 유지율,  $a$ 는 초기 수행 능력,  $\gamma$ 는 시간 척도계수( $\text{month}^{-1}$ ),  $t$ 는 비활동 기간(months),  $b$ 는 숙련도

저하 특성을 나타내는 지수이다. 본 연구에서는  $a = 100\%$ 와  $\gamma = 1 \text{ month}^{-1}$ 로 설정하였다.



[Fig. 1] Simulated decay of operational competence for commercial divers based on the power law of forgetting.

미 육군 조종사를 대상으로 훈련 이후 일정 기간 동안 비행을 수행하지 않았을 때, 비행 기술의 유지 수준을 정량적으로 분석한 연구가 있다(Wright, 1973). 해당 연구에서는 비행 기술을 시계 비행 규칙(Visual Flight Rules, VFR)과 계기 비행 규칙(Instrument Flight Rules, IFR)로 구분하여 비교 분석하였으며, 그 결과 VFR은 약 3년이 경과한 후에도 기능 유지가 가능한 반면, IFR 관련 기술은 훈련 후 12개월이 경과하면 전체 조종사의 50% 이상이 안전 최소 기준 이하로 기능이 저하되는 것으로 나타났다.

본 연구에서는 이와 유사한 방법론을 적용하여 산업잠수사의 숙련도 소실 특성을 분석하였다. [Fig. 1]에 나타난 바와 같이, 산업잠수 작업에서 요구되는 기술 요소를 인지적 부담과 절차적 복잡성에 따라 구분하고, 이를 바탕으로  $b$ 값을 다음과 같이 설정하였다.

- $b = 0.1$  : 수영 능력, 수중 호흡, 장비 착용과 같은 반복적인 신체 활동 중심의 단순 기술
- $b = 0.2$  : 장비 결합, 기본 감압 절차 등 일상적인 잠수 임무에서 반복되는 루틴 절차
- $b = 0.3$  : 비상 기체 공급, 잠수사 구조 등 높은 인지 부담과 즉각적 판단이 요구되는 비상 대응 기술

본 연구에서는 기술 유형별 숙련도 감쇠 시나리오를 비교하기 위한 가정값으로 최소 임계 수준을 초기 숙련도의 60%로 설정하였다. 이는 항공기 조종사의 안전 기준이 약 50%로 설정되는 점에 비해 보수적인 기준으로, 산업잠수의 고위험 특성을 반영한 결과이다(Wright, 1973).

자격 취득 후 실무 수행이나 재교육 없이 시간만 경과하는 상황을 가정한 분석 결과는 다음과 같다.

- $b = 0.3$ 의 경우, 자격 취득 후 약 12개월 경과 시 숙련도는 초기의 46.3%로 급감하며, 60개월 경과 시 29.1%까지 감소하여 안전 임계 수준을 현저히 하회하는 것으로 나타났다.
- $b = 0.2$  역시 12개월 경과 시 59.9%로 감소하여 60%의 안전 임계 수준을 소폭 하회한다.
- 반면,  $b = 0.1$ 은 자격 취득 후 60개월이 지나도 숙련도가 66.3%로 유지되어 안전 임계 수준을 상회하였다.

이러한 분석 결과는 장기간 실무에서 이탈한 잠수사가 현장에 복귀할 경우, 기초적인 신체 활동은 가능하더라도, 상황 인지 및 비상 대응 역량은 크게 저하될 수 있음을 시사한다. 즉, 영구 자격 제도는 훈련 공백이나 역량 저하 상태에서 법적 제약 없이 고위험 작업에 투입될 수 있는 구조적 위험성을 내포한다.

따라서 자격 갱신 제도는 잠수사의 신체적·인지적 준비 상태를 주기적으로 검증함으로써, 잠재적인 사고 발생 가능성을 낮추는 핵심 제도적 장치로 기능해야 한다.

#### 나. 국제 기준과 국내 자격 체계의 한계

국제 표준에 부합하는 교육 및 자격 체계의 도입은 산업잠수 작업의 안전성 확보를 넘어, 국내 해양 산업의 국제 경쟁력 및 사업 참여 가능성을 좌우하는 핵심 제도적 요소라 할 수 있다. 최근 국내에서 추진 중인 중인 대규모 해상풍력 단지 조성 사업이나 해외 해양 플랜트 프로젝트의 경우, 발주처는 계약 단계에서부터 IMCA, ADCI 등 국제

산업잠수 기준의 준수를 명시적으로 요구하는 것이 일반화되고 있다. 이러한 환경에서 잠수 인력의 국제적 자격 인정 여부는 단순한 인력 구성의 문제가 아니라, 프로젝트 참여 가능성 자체를 좌우하는 핵심 조건으로 작용한다.

그러나 현행 국내 산업잠수 자격 체계는 국제적으로 통용되는 운용 역량을 객관적으로 입증할 수 있는 제도적 기반을 충분히 갖추지 못하고 있다. 이로 인해 국내 공사임에도 불구하고 외국 인증 자격을 보유한 잠수사가 현장에 투입되는 사례가 빈번하게 발생한다. 예를 들어, 거가대교 침매터널 산업잠수 공사에서는 전체 30명의 잠수사 중 대한민국 국적자는 10명에 불과했고, 나머지 20명은 네덜란드, 영국, 독일, 인도 등 해외 자격을 보유한 외국인 잠수사로 구성되어 있었다(Woo, 2015).

해당 사례는 단순한 국내 인력의 기술 부족이 아닌, 프로젝트 발주 구조와 국제 기준 중심의 시공·안전관리 체계가 국내 자격 제도와 제도적으로 호환되지 않았던 구조적 문제에서 기인한 것으로 해석된다. 당시 시공의 주관사였던 대우건설은 국내 최초의 침매터널 공사의 기술적 리스크를 관리하기 위해, 관련 분야에서 풍부한 실적과 특허를 보유한 네덜란드 Strukton사와 기술 제휴를 체결하였다. 이에 따라 주요 시공 공정은 Strukton사의 주도로 진행되었고, 잠수 작업 또한 IMCA 기준에 기반한 절차와 인력 운용 체계에 따라 수행되었다.

이 과정에서 초기에는 대부분 IMCA 자격을 보유한 해외 잠수사가 투입되었으나, 국내 특성에 따른 어선 협조 문제, 복잡한 해저 지형, 장기 공정에 따른 인력 수급 한계 등이 누적되면서, IMCA 자격을 보유한 국내 잠수사가 추가로 투입되었다. 이후 공사가 장기화됨에 따라 해외 잠수사 수급에 어려움이 발생했고, 국내 잠수사들이 추가 교육 및 자격 취득을 통해 현장에 점차 합류하는 구조적 전환이 이루어졌다.

이는 국내 잠수사의 역량 자체보다는, 자격 체

계의 국제적 호환성 부재로 인해 발생한 제약이라는 점에서 시사하는 바가 크다. 동일한 기술력을 갖춘 인력이라 하더라도, 이를 국제적으로 공식 인정할 수 있는 제도적 장치가 부재하면 현장 참여가 제한될 수밖에 없다. 결국 이는 국내 산업잠수 자격 제도가 국제 산업 현장에서 요구하는 신뢰성, 검증 가능성, 제도적 호환성을 확보하지 못하고 있음을 단적으로 보여주는 사례라 할 수 있다.

따라서 NCS 기반의 산업잠수 교육 과정을 국제 기준과 정합성 있게 고도화하고, 평가 방식, 로그북 기반 경력 검증, 자격 유지 및 갱신 체계 등을 포함하는 종합적 제도 개선이 필요하다. 이는 단순한 자격 체계 개편의 차원을 넘어, 국내 잠수 인력이 글로벌 해양 산업 현장에 안정적으로 참여할 수 있도록 하는 선결 조건이자 필수 제도 기반이다.

더 나아가, 이는 해외 해양 공사 프로젝트 수주 확대, 고부가가치 산업 참여 증대, 해양 플랜트 산업의 자립화 및 지속 가능한 국가 해양 산업 성장 기반을 확보하기 위한 필수적인 산업 전략 요소로 평가되어야 한다.

#### 다. 책임 기반 잠수 감독체계 구축 방안

국내 산업잠수 현장에서 반복적으로 지적되는 문제 중 하나는 사고 발생 시 지휘 및 안전관리 책임의 귀속이 명확하지 않다는 점이다. 현행 제도상 잠수 감독관은 법적·제도적 권한이 부여된 안전관리 책임자라기보다는, 단순히 경력이 많은 선임 잠수사 또는 작업 책임자로 인식되는 경향이 강하다. 이로 인해 작업 중지 판단이나 고위험 작업에 대한 통제 권한이 실질적으로 작동하지 못하는 구조적 한계를 보인다.

반면, 국제 산업잠수 기준은 책임 기반 지휘체계를 명확히 채택하고 있다. 예를 들어, International Marine Contractors Association(2014)는 잠수 감독관을 현장 잠수 작업의 통제와 안전관리를 담당하는 책임자로 규정하고 있으며 잠수 작업의 시

작, 보건·안전 관련 직접 지시, 위험 상황에서의 작업 중지 판단 등 핵심적인 현장 통제 기능을 수행하도록 요구하고 있다. 다만 이러한 권한의 법적 효력은 해당 국가의 법령, 계약 조건, 발주처 요구사항 및 회사의 안전관리 절차에 편입되는 방식에 따라 달라질 수 있다. 또한 [Fig. 2]와 같이 공식 로그북 상의 감독관 서명을 통해 잠수 작업이 승인된 절차 및 안전 기준에 따라 수행되었음을 공식적으로 검증하게 되어 있다. 이는 단순한 서류 작업이 아니라, 사고 발생 시 감독관의 판단과 결정이 책임 추적 체계로 연결되는 핵심 제도적 장치이다.

#### IMCA Professional Diver's Logbook Record of Dive

[Fig. 2] Example of an IMCA diver's logbook used to formally verify dive records and associated supervisory sign-off (Source: Woo, 2015).

이러한 권한은 감독관이 별도의 교육과 엄격한 자격 평가를 통해 선발되는 구조에 의해 정당화된다. 즉, 감독관은 단순한 직책이 아니라, 현장의 안전을 책임지는 최종 의사결정자로 제도적으로 정의된 전문 직무로 기능한다. 반면, 국내 제도에서는 감독관의 법적 권한과 책임 범위에 대한 명확한 정의가 부재하고, 무리한 공정 압박이나 상위 관리자 개입에 따라 안전 판단이 후순위로 밀릴 가능성이 상존한다.

따라서 국내 산업잠수 제도 역시 감독관을 단순한 보직이 아닌 법적 안전관리 주체로 재정의할 필요가 있다. 이를 위해서는 감독관 전용 자격 제도의 신설, 독립적인 교육·평가 시스템 도입, 작업 중지권에 대한 명문화가 반드시 병행되어야 한다. 이러한 제도적 전환은 잠수 감독관의 판단이 실질적인 안전관리 수단으로 작동하게 함으로써, 현장에서 무리한 작업 지시를 구조적으로 차단하는 역할을 수행하게 된다. 궁극적으로는 산업잠수 작업에서 안전수칙 준수 문화를 정착시키고, 책임 기반의 의사결정 체계를 제도화하는 핵심 기반이 될 수 있다.

#### 라. 지속적 전문성 개발의 제도적 기반

산업잠수 기술은 정체된 영역이 아니라, 혼합기체 운용기술의 고도화, 감압 알고리즘의 정밀화, 장비 자동화 및 디지털화, 그리고 ROV 연계 운용 기술 등 기술적 진보가 지속적으로 이루어지고 있는 분야이다. 그럼에도 불구하고, 현행 국내 자격 체계는 한 번 자격을 취득하면 이후 재교육이나 역량 갱신 없이도 자격이 영구히 유지되는 구조를 유지하고 있어, 잠수사를 과거의 기술 수준과 안전 기준에 장기간 고정시키는 구조적 한계를 내포한다.

의사, 변호사 등 생명·법률과 직결된 전문직군에서는 지속적 전문성 개발 제도가 제도적으로 의무화되어 있으며, 이는 직무 수행 역량을 최신 기준에 맞게 유지하고 사회적 신뢰를 확보하기 위한 핵심 안전장치로 인식되고 있다. 산업잠수

역시 생명과 직결되는 고위험 작업이라는 점에서 예외일 수 없다.

특히, 산업잠수 분야에서는 잠수 장비, 감압 기준, 비상 대응 절차 등 안전 관련 요소들이 기술 발전과 사고 사례 분석을 바탕으로 지속적으로 개정되며, 과거 경험에만 기반한 지식은 오히려 위험 요인으로 작용할 가능성이 있다. 이러한 특성을 고려할 때, 주기적인 보수 교육과 기술 업데이트를 통해 잠수사가 최신 기준을 지속적으로 숙지하도록 관리하는 체계는 선택이 아닌 필수 조건이다.

따라서 산업잠수 자격 제도는 단순히 취득 시점의 역량을 일회적으로 검증하는 정적 시스템이 아니라, 지속적인 전문성 개발과 역량 검증을 통해 ‘현재 운용 가능 역량’을 보증하는 동적 관리 체계로 전환되어야 한다. 이러한 CPD 기반의 자격 관리 체계는 개별 잠수사의 전문성 향상뿐만 아니라, 산업잠수 분야 전반의 안전 수준과 기술 신뢰성을 체계적으로 제고하는 데 기여하는 제도적 기반으로 작용할 수 있다(International Marine Contractors Association, 2026).

#### 마. 교육기관 품질관리 체계 강화 방안

산업잠수 자격 제도의 개선은 자격 등급의 세분화, 역할 기반의 자격 구조 정립, 자격 갱신과 CPD 도입 등의 방향으로 추진될 필요가 있으며, 이는 단지 법제도적 변화에 국한되지 않는다. 제도의 실질적 효과를 확보하기 위해서는 이러한 제도 변화에 부합하는 교육기관의 질적 수준 제고가 병행되어야 하며, 기존 교육기관의 한계를 극복할 수 있는 새로운 교육 인프라 구축이 필수적이다.

현행 산업잠수 교육기관은 주로 직업훈련 중심 기관으로 구성되어 있으며, 교육 품질의 관리 기준은 기관의 행정적 요건이나 물리적 시설 여부를 확인하는 수준에 머무르고 있다. 그러나 자격 체계가 고도화되고 교육 내용이 혼합기체 운용, 비상 대응 절차, ROV 연계 운용 등 고위험 복합

작업으로 확장되는 경우, 단순 직무 훈련이 아닌 전문성과 통합성을 갖춘 교육 과정 설계와 이수자 평가 체계가 요구된다.

이러한 해양 관련 전문 역량을 갖춘 고등교육 기관은 고도화된 교육과 품질관리를 수행할 수 있는 주요 교육 주체 중 하나가 될 수 있다. 특히, 해양공학·잠수기술·수중로봇공학 등의 융합 분야 교육 경험을 보유한 대학은 산업잠수 전문 교육의 질적 고도화를 위한 교과과정 개발, 시뮬레이션 기반 훈련 체계 구축, 잠수 전문가 양성 등 다양한 역할을 수행할 수 있다. 또한, 대학은 공신력 있는 외부 평가 시스템 및 연구 기반의 피드백 루프를 갖추고 있어, 산업잠수사 교육을 단순 직무 이수 훈련이 아닌 지속 가능한 전문 인력 양성 체계로 전환하는 데 중요한 역할을 할 수 있다.

따라서 산업잠수 자격 제도의 선진화는 단순한 법·제도적 개선에 그치지 않고, 이에 부합하는 고등 수준의 교육 기반 확충을 통해 뒷받침되어야 한다. 이를 위해서는 국가 차원의 정책적 지원을 바탕으로, 해양 전문 국립대학을 중심으로 한 산업잠수 전문 교육기관의 신규 지정 및 품질관리 체계 구축이 병행되어야 하며, 이는 산업 전반의 안전 수준 제고뿐 아니라 국내 산업잠수의 국제 신뢰도 확보와 전문직으로서의 위상 정립에도 기여할 수 있을 것이다.

#### IV. 결 론

본 연구는 산업잠수가 수중 고압 환경, 제한된 시야, 복합적인 장비 운용, 그리고 즉각적인 비상 대응을 요구하는 대표적인 고위험 작업임에도 불구하고, 국내 산업잠수 교육 및 자격관리 체계가 이러한 위험 특성을 충분히 반영하지 못하고 있음을 국내외 제도 비교 분석을 통해 확인하였다. 특히, 국내 자격 체계는 자격 취득 이후의 지속적인 역량 검증과 관리가 부재한 영구 자격 구조, 자격 등급 간 역할과 책임의 불분명성, 그리

고 교육기관 품질 관리의 미흡으로 인해, 산업잠수 분야에서의 실질적인 안전관리 수단으로 기능하는 데 한계가 있음을 드러냈다.

반면, IMCA, ADCI, ADAS 등 주요 국제 산업잠수 인증 체계는 역할 기반 자격 분화, 로그북 기반 실무 경험 검증, 정기적인 의료 적합성 평가, 그리고 자격 갱신 제도를 통해 잠수사의 ‘현재 운용 가능 역량’을 지속적으로 관리하는 구조를 갖추고 있다. 이러한 국제 기준은 자격이 단순한 행정적 면허가 아니라, 특정 위험 조건에서의 안전 수행 능력을 보증하는 제도적 장치로서 작동함으로써, 국내 체계와 본질적으로 구별된다.

또한, 본 연구에서는 망각의 역법칙을 적용한 숙련도 감쇠 분석을 통해, 자격 취득 후 장기간 실무 수행이나 재교육이 이루어지지 않을 경우, 비상 대응과 같은 고위험 핵심 역량이 단기간 내 급격히 저하될 가능성을 가정된 조건에서 예시적으로 나타내었다. 이 결과는 영구 자격 제도가 산업잠수 안전관리 체계 내 구조적 취약 요소가 될 수 있음을 개념적으로 뒷받침하며, 자격 갱신 및 주기적 역량 검증 제도 도입의 필요성을 검토하기 위한 기초적 근거로 활용될 수 있다.

아울러, 자격 제도가 국제 기준에 부합하는 방향으로 개선된다면, 그에 걸맞은 고도화된 교육기관의 역할이 필수적이다. 기존의 민간 교육기관 중심의 공급 구조는 장비·시설·인력 측면에서 한계가 있으며, 특히 실무 경험이 풍부한 전문가 확보나 품질 인증 기반 운영체계 마련에 어려움을 겪고 있다. 이에 따라 산업잠수 교육을 담당할 새로운 교육 주체의 참여가 요구되며, 해양 분야에 특화된 역량을 갖춘 국립대학 또는 지역 거점 국립대학이 이를 선도할 수 있을 것으로 기대된다. 대학은 연구 기반의 교육 커리큘럼 개발, 교육 품질의 지속적 관리, 학문적·실무적 연계 강화를 통해 산업잠수 전문 교육기관으로서의 제도적 기반 역할을 수행할 수 있다.

이러한 제도 개선은 산업잠수 종사자의 안전성 제고뿐 아니라, 국제 기준과의 제도적 정합성을

강화함으로써, 국내 해양 산업의 글로벌 신뢰도 제고와 해외 프로젝트 참여 확대에도 실질적으로 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

## References

- Association of Diving Contractors International(2011). International consensus standards for commercial diving and underwater operations (6th ed.). Association of Diving Contractors International, Houston, TX, U.S.A.
- Australian Diver Accreditation Scheme(2024). ADAS training and assessment code of practice (Ver. 4.1). Australian Diver Accreditation Scheme, Melbourne, Australia.
- Centers for Disease Control and Prevention(1998). Deaths associated with occupational diving—Alaska, 1990 - 1997. Morbidity and Mortality Weekly Report (MMWR), 47(22). U.S. Department of Health and Human Services, Atlanta, GA, U.S.A.
- Choi S(2025). Three divers who died in their 60s during the line work of Hanjin Terminal did not comply with safety rules. Maeil Business Newspaper. Retrieved from <https://www.mk.co.kr/en/society/11381094> on January 3, 2026.
- Health and Safety Executive(2014). Diving at work regulations 1997: Approved code of practice and guidance (L103). Health and Safety Executive, London, U.K.
- International Marine Contractors Association(2014). International code of practice for offshore diving (D 014 Rev. 2). International Marine Contractors Association, London, U.K.
- International Marine Contractors Association(2016). Guidance on competence assurance and assessment (C 003). International Marine Contractors Association, London, U.K.
- International Marine Contractors Association(2026). IMCA Diving CPD. <https://www.imca-int.com/certification/diving/diving-cpd/> on January 3, 2026.
- Kang JH(2022). Causal analysis of fatal accidents in diving operations and development of safety measures: Focusing on official disaster investigation reports. Korea Occupational Safety and Health Agency, Occupational Safety and Health Research Institute, Ulsan, Korea.
- Kim M, Cheon K, Kim Y, Kim T and Lee WD(2025a). A sustainable framework for planning and management of diving operations for underwater search and rescue in strong tidal current environments: Lessons from the Sewol ferry disaster. Sustainability, 17(24), 11073. <https://doi.org/10.3390/su172411073>
- Kim M, Hong S, Jeong S, Kim S and Lee WD(2026). Structural limitations in the education and certification system for commercial diving in Korea. Journal of the Korea Society for Fisheries and Marine Sciences Education, 38(4), 721~741. <https://doi.org/10.13000/JFMSE.2026.8.38.4.721>
- Kim M, Kim S, Kim T, Kim Y and Lee WD (2025b). Daily planning and management of SCUBA diving operations considering tidal current conditions: A case study of the Sewol ferry disaster site. Journal of Coastal Disaster Prevention, 12(1), 37~53. <https://doi.org/10.20481/kscdp.2025.12.1.37>
- Kim M, Song M, Cheon K, Kim T and Lee WD(2025c). Operational strategies for ROVs in underwater search and rescue during large-scale marine disasters. Journal of Ocean Engineering and Technology, 39(4), 467~478. <https://doi.org/10.26748/KSOE.2025.039>
- Kim M, Song M, Park J and Lee WD(2025d). Applicability of integrated ROV-SCUBA operations in underwater search and rescue: A case study of the Sewol ferry disaster. Journal of the Korean Society of Safety, 40(6), 108~117. <https://doi.org/10.14346/JKOSOS.2025.40.6.108>
- Kim M, Song M, Park J, Kim S and Lee WD(2023). Estimation of underwater workable time considering tidal currents: A review of diving equipment. Journal of Coastal Research, 116(sp1), 433~437. <https://doi.org/10.2112/JCR-SI116-096.1>
- Lee WD(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. <https://doi.org/10.14346/JKOSOS.2020.35.1.70>
- Lee WD, Jin DH, Kim Y, Kim T and Kim M(2025a). Depth-specific analysis of efficiency and workforce

- requirements in diving operations under no-decompression conditions. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 37(6), 247~262.  
<https://doi.org/10.9765/KSCOE.2025.37.6.247>
- Lee WD, Kang C, Hong S, Lee TK and Lee J(2021). Effect of wave load on decompression of underwater workers: CFD-VPM simulation. *Journal of Coastal Research*, 114(sp1), 614~618.
- Lee WD, Kim SG, Kim MH and Lee JH(2019a). Air diving operation, management and planning for safe and effective underwater works. *Journal of the Korean Society of Safety*, 34(4), 103~110.  
<https://doi.org/10.14346/JKOSOS.2019.34.4.103>
- Lee WD, Lee J and Lee JH(2019b). Applicability of nitrox diving for improved safety and efficiency of underwater operations. *Journal of Coastal Research*, 91(sp1), 206~210.  
<https://doi.org/10.2112/SI91-042.1>
- Lee WD, Kim Y, Kim T and Kim M(2025b). 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.  
<https://doi.org/10.9765/KSCOE.2025.37.2.38>
- Lee WD, Kim Y, Kim T and Kim M(2025c). 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.  
<https://doi.org/10.9765/KSCOE.2025.37.2.50>
- Wickens TD(1998). On the form of the retention function: Comment on Rubin and Wenzel (1996): A quantitative description of retention. *Psychological Review*, 105(2), 379~386.  
<https://doi.org/10.1037/0033-295X.105.2.379>
- Woods A(2022). A report on fatalities in commercial diving. Institute of Energy and Environmental Flows, University of Cambridge, Cambridge, U.K.
- Woo DH(2015). A case study of nitrox usage in diving operation of the Busan-Geoje fixed link immersed tunnel. Master's Thesis, Korea Maritime and Ocean University, Busan, Korea.
- Wright RH(1973). Retention of flying skills and refresher training requirements: Effects of nonflying and proficiency flying. HumRRO Technical Report No. 73-32. Human Resources Research Organization, Alexandria, VA, U.S.A.

- 
- Received : 09 June, 2026
  - Revised : 03 July, 2026
  - Accepted : 11 July, 2026