

■ 박태성¹, 신명준^{1,2*}

■ ¹부산대학교병원 융합의학기술원, 의생명연구원, ²부산대학교병원, 부산대학교 의과대학 재활의학과

Observation of Heart Rate Changes in a Real Open-Water Diving Environment: A Pilot Study

Tae-Sung Park PT, Ph.D¹, Myung-Jun Shin, Doctor, Ph.D^{1,2*}

¹Department of Convergence Medical Institute of Technology & Biomedical Research Institute, Pusan National University Hospital

²Department of Rehabilitation Medicine, Pusan National University Hospital & Pusan National University School of Medicine

Purpose: This pilot study was conducted to observe real-time heart rate(HR) changes during a multistage diving protocol in an actual open-water environment and identify cardiorespiratory response characteristics. This study intends to provide foundational physiological data for diver safety and development of aquatic cardiac rehabilitation programs. **Methods:** Four healthy male divers participated in this study, which was conducted at a depth of 12-14 m. The protocol consisted of four phases: descent(phase 1), comfortable activity(phase 2), fast swimming(phase 3; performed at a maximum sustainable pace), and ascent/safety stop(phase 4). HR was continuously recorded using a diving computer paired with a chest-strap sensor, and the data were analyzed to identify phase-specific patterns. **Results:** HR showed distinct phase-dependent fluctuations across all sessions. Phase 3(fast swimming) elicited the highest HR response(147.39 ± 15.31 beats per minute(bpm)), which was higher than that observed in phases 1(118.73 ± 14.06 bpm) and 2(118.81 ± 16.58 bpm). During phase 4, HR decreased to 122.62 ± 13.58 bpm, confirming a consistent and reproducible pattern of gradual rise, peak, and recovery aligned with activity intensity in the marine environment. **Conclusion:** The results confirmed that HR responses vary systematically according to activity intensity and are consistently reproducible even in an open-water environment. These findings provide foundational data for diver safety monitoring and preliminary evidence to inform the design of aquatic cardiac rehabilitation and physical therapy programs.

Key words: Heart rate, Hydrostatic pressure, Open water, Scuba diving

Received: December 18, 2025 / **Revised:** December 31, 2025 / **Accepted:** January 07, 2026

I. 서론

최근 해양 레저 산업의 성장과 함께 스쿠버다이빙을 포함한 수중 활동에 참여하는 인구가 지속적으로 증가하고 있으며, 과거 특정 전문 직업군이나 일부 전문가들의 활동으로 인식되던 스쿠버다이빙은 현재 일반 성인을 중심으로 한 대중적인 레저 스포츠로 확대되고 있다. 스쿠버다이빙은 수중이라는 특수한 환경에서 수행되는 활동으로 수압 변화, 부력, 호흡 저항 증가, 심리적 긴장

등 다양한 환경적 요인이 심폐계에 부담으로 작용할 수 있으며, 이러한 생리적 변화는 안전사고와도 직결될 수 있다(Marabotti 등, 2013; Di Pumpo 등, 2023). 이에 따라 дайвер의 안전 확보와 생리적 상태를 모니터링하려는 필요성 또한 지속적으로 강조되고 있다(Park 등, 2025).

심박수는 운동 강도와 심폐 부담을 반영하는 대표적인 생리 지표로, 육상 환경에서는 유산소 운동 강도 조절, 심장 재활, 운동 처방 및 심폐 기능 평가 등에 폭넓게 활용되고 있다(Liu 등,

This research was supported by the development of standard manufacturing technology for marine leisure vessels and safety support robots for underwater leisure activities, funded by the Korea Institute of Marine Science & Technology Promotion (KIMST) under the Ministry of Oceans and Fisheries (KIMST-20220567).

교신저자: 신명준

주소: 부산광역시 서구 구덕로 179 부산대학교병원 재활의학과 의국, E-mail: drshinmj@pusan.ac.kr

2024). 최근에는 웨어러블 센서와 다이빙 컴퓨터 기술의 발전으로 실제 수중 환경에서도 심박수를 비교적 안정적으로 측정하려는 시도가 증가하고 있으며, 이를 활용한 дай버 안전 관리 기술 또한 점차 확대되는 추세이다(Cibis 등, 2015; Eun 등, 2019)

최근에는 다이버의 안전을 향상시키기 위한 다양한 기술 개발 시도가 증가하고 있다. 기존의 수심, 상승 속도, 감압 상태 중심의 다이빙 컴퓨터를 넘어, 심박수를 포함한 생리 신호를 기반으로 다이버의 생리적 부담을 실시간으로 평가하고 이를 안전 관리에 활용하려는 시도가 확대되고 있다(Lee 등, 2024). 이러한 기술이 실제 현장에서 신뢰성 있게 적용되기 위해서는, 무엇보다 실제 바다 환경에서 다이버의 심박수가 어떠한 범위와 패턴으로 변화하는지에 대한 기초적인 관찰 자료가 선행될 필요가 있다.

그러나 현재까지 보고된 대부분의 선행 연구는 수영장이나 제한된 수심 환경에서 수행되었거나, 단일 활동 강도에서의 심박 반응을 관찰한 경우가 많다(Di Pumpo 등, 2023; Mulder 등, 2021). 실제 바다 잠수 환경에서 하강, 안정적인 수중 활동, 고강도 유영, 상승 및 안전 정지와 같이 다이빙 과정 전반에 걸쳐 반복적으로 변화하는 활동 강도를 반영하여 심박수 변화를 단계별로 분석한 연구는 매우 제한적이다. 또한 기존 연구들은 특정 구간 또는 단일 활동 조건에서의 평균 심박 반응에 초점을 두어, 실제 다이빙 상황에서 나타나는 연속적이고 동적인 심박 패턴을 충분히 설명하는 데 한계가 있었다.

이에 본 연구는 실제 바다 잠수 환경에서 다이버가 하강, 편안한 활동, 고강도 유영, 상승 및 안전 정지 단계로 구성된 반복 프로토콜을 수행하는 동안 심박수의 변화를 예비적으로 관찰하는 것을 목적으로 한다. 본 연구는 다이빙 프로토콜에 따른 심박수의 반복적 상승과 회복 양상을 단계별로 탐색함으로써, 실제 해양 환경에서의 기본적인 심폐 반응 특성을 확인하고자 한다. 더 나아가 본 연구에서 확보된 실제 수중 심박수 변화 자료는 향후 다이버 안전 장비 개발을 위한 기초 자료로 활용될 수 있을 뿐만 아니라, 수중 환경을 활용한 심장 재활 및 물리치료 프로그램 개발에 있어서도 중요한 초기 참고 자료가 될 것으로 기대된다. 특히 수중 환경은 부력과 수압이라는 고유한 물리적 특성을 통해(Torres-Ronda 등, 2014) 관절 부담을 줄이면서도 유산소 운동 효과를 극대화할 수 있는 장점을 지니고 있어, 향후 특수 환경 심장 재활 및 수중 기반 물리치료 영역으로의 확장 가능성 또한 함께 고려할 수 있을 것이다.

II. 연구 방법

1. 연구 대상

본 연구는 건강한 성인 남성 다이버 4명을 대상으로 수행되었

표 1. 대상자의 일반적 특성

(n=4)

	Mean±SD
Age (years)	43.75±7.37
Height (cm)	175.75±6.70
Weight (kg)	82.25±20.56
Diving experience (years)	13.00±4.40

다(표 1). 대상자 모집은 부산시에 위치한 H 스쿠버 다이빙 샵에 연구 참여 대상자 모집 공고문을 게시하는 방식으로 이루어졌다. 대상자는 모두 최근 6개월 이내 심혈관계, 호흡기계, 신경계 질환의 병력이 없고, 의사의 진단을 통해 잠수 활동에 의학적 제한이 없는 자로 선정하였다. 또한 수중 활동 수행에 지장을 줄 수 있는 근골격계 질환을 가진 경우는 연구에서 제외하였다. 본 연구에 참여하기 전, 모든 대상자에게 연구의 목적과 절차에 대해 충분한 설명을 제공하였으며, 연구 참여는 자발적으로 이루어졌다. 모든 대상자로부터 서면 동의를 받은 후 연구를 진행하였다. 본 연구는 P병원의 기관생명윤리위원회의 승인을 받아 수행되었다(IRB No. 2503-016-149).

2. 연구 절차

심박수 측정은 실제 바다 잠수 환경에서 단일 세션당 1회의 다이빙 프로토콜을 기준으로 수행되었으며, 각 대상자는 동일한 프로토콜을 2일에 걸쳐 총 2회 수행하였다. 모든 잠수는 동일 해역인 포항 구룡포 수심 12~14 m(약 2.2~2.4 ATA, absolute atmosphere) 해역에서 실시되었으며, 수온은 22~24°C였다. 다이빙 전에는 대상자의 기본 건강 상태를 확인하였으며, 연구 참여 전 지상 환경에서 측정한 심박수와 산소포화도가 정상 범위에 해당하고, 연구 직전까지 다이빙 활동에 제한이 없는 경우에 한해 실험을 진행하였다.

다이빙 프로토콜은 하강 1분(Phase 1), 편안한 활동 3분(Phase 2), 고강도 유영 2분(Phase 3), 상승 및 안전 정지 5분(Phase 4)의 4단계로 구성하였다. 하강 이후 편안한 활동(Phase 2)과 고강도 유영(Phase 3)을 한 주기로 하여 총 3회 반복 수행하였으며, 이후 상승 및 안전 정지 단계로 마무리하였다. 이에 따라 전체 다이빙 프로토콜의 총 소요 시간은 약 20~21분이었다. 이러한 반복적 프로토콜은 실제 다이버 활동 중 발생하는 운동 강도 변화에 따른 심박 반응을 관찰하기 위해 설정되었다. Phase 3의 고강도 유영 단계는 대상자가 주관적으로 인지하는 고강도 운동 수준으로 설정하였다. 대상자에게는 호흡이 가빠지지만 2분간 속도를 일정하게 유지할 수 있는 최대 강도로 유영하도록 지시하였으며, 버디 다이버의 감독 하에 과도한 호흡 곤란이나 안전 위험이 발생하지 않는 범위 내에서 수행하도록 하였다. 실제 바다 환경에서는 수중에서 공식적인 운동자각도 척도를 적용하는 데

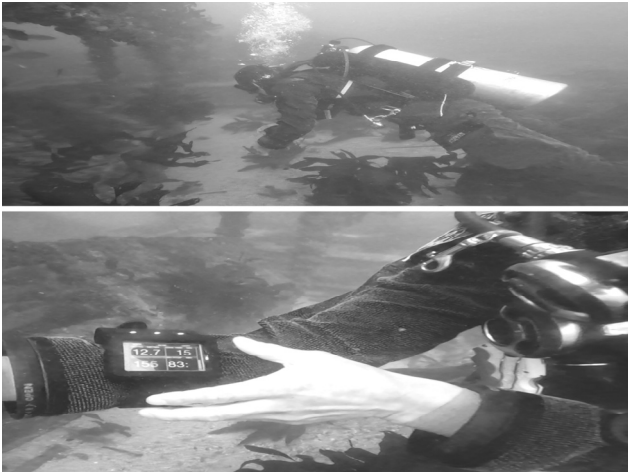


그림 1. 실험 환경 및 측정 장비(다이빙 컴퓨터)

현실적인 제약이 있어, 본 연구에서는 현장 적용성을 고려한 주관적 강도 설정 방식을 채택하였다.

각 다이빙 세션 동안 심박수는 다이빙 컴퓨터(Scubapro Galileo 2, Scubapro, USA)를 이용하여 연속적으로 기록하였으며(Figure 1)(Lee 등, 2020), 기록된 심박 데이터는 사후 분석을 위해 저장하였다. 모든 대상자는 가슴 위치에 심박 측정 센서를 착용하였고, 측정 중 장비 이탈이나 신호 오류를 최소화하기 위해 다이빙 전 장비 착용 상태를 충분히 확인하였다. 대상자의 1회차와 2회차 측정 간에는 1일의 휴식 기간을 두어 이전 다이빙에 따른 피로 영향을 최소화하였다. 모든 다이빙은 임상 경력 10년 이상의 물리치료사와 다이빙 안전 관리자의 공동 감독 하에 동일한 조건의 해양 환경에서 시행되었으며, 측정 환경과 절차의 일관성을 유지하도록 하였다.

3. 측정 도구 및 방법

심박수 측정은 Scubapro Galileo 2와 연동된 가슴 착용형 심박 센서 벨트(Scubapro HRM Belt, Polar technology, Finland)를 이용하여 수행되었다. 심박 센서 벨트는 대상자의 흉부 하부에 밀착되도록 착용하였으며, 전기적 신호를 기반으로 심박수를 실시간으로 감지하여 다이빙 컴퓨터로 무선 전송하는 방식으로 작동한다. Scubapro Galileo 2는 수중 환경에서도 심박수를 연속적으로 기록할 수 있도록 설계된 다이빙 컴퓨터로, 수심, 잠수 시간, 상승 속도 등의 환경 정보와 함께 심박수를 동시에 저장할 수 있는 장비이다. 본 연구에서는 다이빙 시작부터 종료 시점까지 전 구간에서 심박수가 연속적으로 기록되도록 설정하였으며, 측정된 모든 데이터는 다이빙 종료 후 장비에서 추출하여 사후 분석에 사용하였다. 사후 분석에서는 사전에 설정된 시간 기반 다이빙 프로토콜을 기준으로 Phase를 구분하였으며, 다이빙 컴퓨터에 기록된 수심 데이터를 함께 확인하여 각 단계의 시작

과 종료 시점을 교차 검증하였다. 심박 센서 벨트는 방수 기능을 갖추고 있으며, 수중 환경에서도 안정적인 심박수 측정이 가능하도록 설계되어 있다. 측정 전에는 모든 대상자에게 센서 착용 방법을 충분히 설명하고, 가슴 부위에 정확히 밀착되었는지 확인한 후 측정을 시작하였다. 또한 측정 중 장비 이탈이나 신호 오류를 최소화하기 위해 다이빙 전 장비 연결 상태와 신호 수신 여부를 반드시 확인하였다.

4. 자료 분석

본 연구는 실제 바다 잠수 환경에서 수행된 예비 관찰연구로, 수집된 자료는 통계적 가설 검정보다는 기술적 분석을 중심으로 처리하였다. 각 대상자에 대해 다이빙 컴퓨터에 저장된 심박수 데이터를 추출한 후, 하강(Phase 1), 편안한 활동(Phase 2), 고강도 수영(Phase 3), 상승 및 안전 정지(Phase 4)로 구분된 각 단계별로 심박수를 분류하였다. 각 Phase별 심박수는 평균, 최소값, 최대값으로 요약하였으며, 대상자의 1회차 및 2회차 반복 측정 간 심박수 변화 양상은 시간 흐름에 따른 패턴 비교 방식으로 시각화하여 분석하였다. 또한 전체 세션별 평균 심박수, 최소 심박수, 최대 심박수 및 최대 수심을 산출하여 실제 바다 환경에서의 심박수 분포 범위를 확인하였다.

본 연구는 소규모 표본을 대상으로 한 예비 연구의 특성을 고려하여, 집단 간 비교를 위한 통계적 유의성 검정은 시행하지 않았으며, 실제 수중 활동 단계에 따른 심박 반응의 반복성, 상승·회복 패턴, 단계별 경향성을 중심으로 결과를 해석하였다. 모든 자료 처리는 Microsoft Excel(Microsoft Corp., USA)을 이용하여 수행하였다.

Ⅲ. 연구결과

1. 세션별 심박수 분포 및 요약

총 4명의 대상자가 2일간 동일한 프로토콜을 수행하여 총 8회의 잠수 세션 자료가 분석에 포함되었다. 세션 전체에서 기록된

표 2. 세션별 심박수 요약

Dive Session	Mean±SD (bpm)	Min	Max
1	111.27±10.95	88	134
2	140.80±12.12	113	165
3	132.64±18.76	102	173
4	137.39±15.84	107	164
5	136.67±21.70	90	171
6	114.77±16.47	69	143
7	122.23±13.79	99	155
8	128.55±22.53	62	164

평균 심박수는 111.27 ± 10.95 bpm에서 140.80 ± 12.12 bpm 범위를 보였으며, 최소 심박수는 62 bpm, 최대 심박수는 173 bpm으로 나타났다. 세션별 요약 데이터는 표 2에 제시하였다.

2. 다이빙 단계(Phase)별 심박수 반응

다이빙 프로토콜을 Phase별로 분석한 결과, 모든 세션에서 고강도 유영 구간(Phase 3)에서 가장 높은 심박 반응이 일관되게 관찰되었다. Phase 3의 평균 심박수는 147.39 ± 15.31 bpm으로, 하강(Phase 1: 118.73 ± 14.06 bpm), 편안한 활동(Phase 2: 118.81 ± 16.58 bpm), 상승 및 안전 정지 단계(Phase 4: 122.62 ± 13.58 bpm)에 비해 높게 나타났다. Phase별 심박수 요약 결과는 표 3에 제시하였다.

표 3. Phase별 심박수 요약 (전체 세션 합산)

Phase	Mean $\pm$ SD (bpm)	Min	Max
Phase 1	118.73 ± 14.06	62	141
Phase 2	118.81 ± 16.58	69	158
Phase 3	147.39 ± 15.31	104	173
Phase 4	122.62 ± 13.58	99	158

Phase 1: 하강, Phase 2: 편안한 활동, Phase 3: 고강도 유영, Phase 4: 상승 및 안전 정지

3. 시간 흐름에 따른 심박수 변화 패턴

시간 흐름에 따른 심박수 변화를 분석한 결과(Figure 2), 하강 구간 이후 심박수가 점진적으로 상승하여 고강도 유영 구간에서

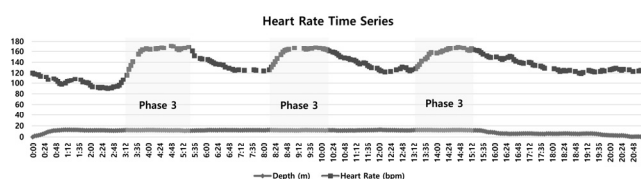


그림 2. 다이빙 프로토콜 수행 중 심박수와 수심의 변화 데이터

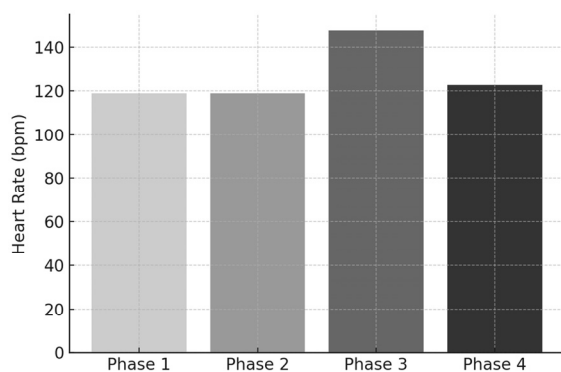


그림 3. 다이빙 프로토콜의 4단계에 따른 평균 심박수 비교

최고치를 기록한 뒤, 상승 및 안전 정지 단계에서 감소하는 상승-최고-회복 패턴이 모든 세션에서 공통적으로 관찰되었다. 이러한 패턴은 대상자 및 날짜가 달라도 반복적으로 나타나 실제 바다 환경에서도 운동 강도 변화에 따른 심박 반응이 안정적으로 재현됨을 확인할 수 있었다(Figure 3). 종합하면, 실제 바다 잠수 환경에서도 다이버의 심박수는 활동 강도에 따라 의도한 Phase 구조에 맞춰 체계적으로 변하며, 특히 빠른 유영 구간에서 심박수 상승이 가장 두드러졌다.

IV. 고찰

본 연구는 실제 바다 잠수 환경에서 수행된 예비 관찰연구로, 다이빙 활동 단계에 따른 심박수 변화 양상을 탐색적으로 관찰하고자 하였다. 연구 결과, 다이버의 심박수는 활동 강도에 따라 변화하는 경향을 보였으며, 특히 고강도 유영 구간(Phase 3)에서 상대적으로 높은 심박 반응이 나타나는 양상이 관찰되었다. 이러한 결과는 수심 12~14 m의 바다 환경에서도 활동 강도 변화에 따라 심박 반응이 달라질 수 있음을 시사한다.

본 연구에서 관찰된 심박수 변화 패턴은 하강 이후 점진적인 상승, 고강도 유영 구간에서의 최고치 도달, 이후 상승 및 안전 정지 단계에서의 감소로 요약할 수 있다. 이러한 상승, 최고, 회복 패턴은 모든 대상자와 반복 측정에서 공통적으로 확인되었으며, 이는 실제 바다 환경이라는 변동성이 큰 조건에서도 프로토콜 기반 심박 반응이 비교적 안정적으로 재현될 수 있음을 보여준다. 이는 수중 활동 중 심박수를 활용한 생리적 모니터링의 가능성을 뒷받침하는 근거로 해석될 수 있다.

기존의 수중 생리 반응 연구들은 주로 수영장 환경이나 실험실 기반의 시뮬레이션 조건에서 수행된 경우가 많았으며(Di Pumpo 등, 2023; Mulder 등, 2021), 실제 바다 환경에서 다이버의 심박수 변화를 연속적으로 분석한 연구는 제한적이었다. 선행 연구에 따르면 수중 환경에서는 수압 증가, 수온 저하, 심리적 긴장, 신체 활동 강도의 변화 등이 복합적으로 작용하여 자율신경계 반응을 유발하고, 이에 따라 심박수는 잠수 전 상승, 잠수 중 감소 또는 활동 강도에 따른 변동 등 다양한 양상을 보이는 것으로 보고되었다(Lundell 등, 2021; Zenske 등, 2020; Schaller 등, 2021; Foster 등, 2005). 그러나 이러한 심박 반응의 대부분은 제한된 수심, 짧은 관찰 구간, 또는 단일 활동 조건에서 관찰된 결과로, 실제 다이빙 중 반복적으로 변화하는 활동 강도를 충분히 반영하지 못했다. 특히 기존 연구들에서는 하강, 유영, 정지, 상승과 같은 다이빙의 세부 단계별 심박 반응을 체계적으로 구분하여 분석한 사례가 드물었으며, 대부분 잠수 전후 또는 단일 구간의 평균 값 비교에 그치는 한계가 있었다(Bruzzi 등, 2022; Bosco 등, 2014). 또한 실제의 바다 환경에서는 부력 조절, 조류, 시야, 수온

변화 등으로 인해 동일한 작업 강도라도 심박 반응이 달라질 수 있음에도 불구하고, 이러한 요소를 포함한 반복적 프로토콜 기반의 분석은 국내에서 충분히 이루어지지 않았다.

본 연구는 이러한 선행연구의 한계를 보완하고자 실제 바다 잠수 환경에서 하강, 편안한 활동, 고강도 수영, 상승 및 안전 정지로 구성된 반복적 프로토콜을 적용하고, 각 단계별 심박 반응을 연속적으로 측정하였다. 특히 동일한 프로토콜을 2회 반복 수행함으로써, 실제 현장 환경에서도 심박 반응의 패턴과 반복성을 확인할 수 있었다는 점에서 기존 연구 대비 차별성을 가진다. 이러한 결과는 실제 다이빙 상황에서 심박수 변화가 단순한 잠수 전후의 변화가 아니라, 활동 강도와 잠수 단계에 따라 동적으로 조절됨을 시사한다. 더 나아가, 본 연구에서 관찰된 단계별 심박 반응 패턴은 향후 дайвер 안전 장비 개발 및 수중 생체신호 모니터링 시스템 설계에 있어 기초 자료로 활용될 수 있다. 선행 연구에서 제시된 바와 같이 심박수는 수중 환경에서 자율신경계 반응과 신체적 부담을 반영하는 핵심 지표로 제안되어 왔으며, 본 연구는 이러한 이론적 논의를 실제 바다 환경에서의 반복 측정을 통해 실증적으로 뒷받침하는 역할을 한다.

이러한 해석을 바탕으로, 본 연구 결과는 임상 현장에서 수중 활동 중 심박 반응을 이해하고 적용하는 데 다음과 같은 시사점을 제공한다. 임상적 관점에서 본 연구의 결과는 дайвер 안전 관리뿐만 아니라 수중 재활 및 물리치료 분야에서의 적용 가능성을 시사한다. 심박수는 심폐 부담을 반영하는 대표적인 생리 지표로, 수중 환경에서도 활동 강도 조절과 안전 모니터링을 위한 핵심 지표로 활용될 수 있다. 향후 수중 활동 중 실시간 심박수 모니터링이 보다 보편화된 경우, дайвер의 과도한 심폐 부담을 조기에 인지하고 잠재적인 안전 사고를 예방하는 데 기여할 수 있을 것으로 기대된다(Cibis 등, 2015; Eun 등, 2019; Lee 등, 2024).

본 연구에서 관찰된 심박수는 일반적인 안정 시 심박수보다 상대적으로 높은 수준에서 시작되었는데, 이는 실제 잠수 환경의 특성을 반영한 결과로 해석될 수 있다. 다이버는 입수 전부터 슈트와 공기통 등 다양한 장비를 착용하며, 이러한 장비 착용에 따른 추가적인 중량 부하와 체온 상승, 잠수 전 신체 활동은 다이빙 시작 전부터 심박수를 상승시킬 수 있는 요인으로 작용한다. 그럼에도 불구하고 본 연구에서는 잠수 상황에서도 활동 강도에 따라 심박수가 단계적으로 증가하는 양상이 관찰되었으며, 이는 수중 환경에서도 대근육 활동 증가에 따른 산소 요구량 증가와 같은 기본적인 운동 생리학적 반응이 유지됨을 시사한다.

더 나아가, 본 연구에서 제시된 실제 바다 환경 기반 심박 반응 자료는 수중 환경을 활용한 심장 재활 및 물리치료 프로그램을 설계하는 데 있어 기초 자료로 활용될 수 있을 것이다. 수중 환경에서는 정수압(hydrostatic pressure)에 의한 정맥 환류량 증가와 안면 침수에 따른 잠수 반사(diving reflex)가 동시에 작용하여 심혈관계에 복합적인 영향을 미치는 것으로 알려져 있다

(Becker, 2009; Alboni 등, 2011). 이러한 특성으로 인해 수중 활동 중 심박 반응은 지상 환경과 다른 양상으로 나타날 수 있으며, 본 연구에서 관찰된 단계별 심박 반응은 단순한 운동 강도 증가뿐만 아니라 수중 환경 특유의 생리학적 기전이 복합적으로 작용한 결과로 해석될 수 있다. 특히 고강도 수영(Phase 3) 구간에서 상대적으로 큰 심박수 상승이 관찰된 점은, 수중 치료나 재활 운동 적용 시 심박 반응이 예상보다 크게 나타날 수 있음을 시사한다. 따라서 물리치료사는 수중 운동 처방 시 수중 환경의 생리적 특성을 충분히 고려하여 대상자의 심폐 부담을 과소평가하지 않도록 주의해야 하며, 가능하다면 실시간 심박 모니터링을 활용하여 심박수의 급격한 변화를 사전에 인지할 수 있는 안전 관리 전략을 마련하는 것이 바람직할 것이다(Adsett 등, 2015).

본 연구는 몇 가지 제한점을 가진다. 첫째, 본 연구는 4명의 대상자를 대상으로 수행된 소규모 예비 연구로, 결과를 전체 다이버 집단으로 일반화하는 데에는 신중함이 요구된다. 그러나 통제된 수영장이 아닌, 조류와 수온 변화 등 예측 불가능한 변수가 존재하는 실제 개방된 바다(Open water) 환경에서 엄격하게 통제된 프로토콜을 수행하는 것은 물리적·안전상의 제약이 매우 크다. 본 연구는 이러한 현장 연구의 내재적 어려움 속에서도 실제 환경의 생리적 데이터를 확보했다는 점에서 희소성을 가진다. 둘째, 고강도 수영 단계의 운동 강도는 대상자의 주관적 인지를 기반으로 설정되어, 운동 강도가 객관적으로 완전히 표준화되지 못한 한계가 있다. 이는 실제 바다 환경에서 수중 활동 중 공식적인 운동 강도 척도를 적용하는 데 현실적인 제약이 있기 때문이다. 향후 연구에서는 수중 환경에서도 적용 가능한 운동 강도 지표 또는 생체신호 기반 강도 분류 기준을 병행함으로써, 운동 강도 통제의 객관성을 보완할 필요가 있을 것이다. 그럼에도 불구하고 본 연구는 실제 바다 잠수 환경에서 단계별 프로토콜에 따른 심박 반응을 예비적으로 관찰하였으며, 향후 대규모 대상자를 포함한 후속 연구를 설계하고 안전성 기준을 확립하는 데 있어 기초 자료를 제공한다는 점에서 중요한 의의를 지닌다.

그럼에도 불구하고 본 연구는 실제 바다 환경에서 다이버의 심박 반응을 단계별 프로토콜에 따라 체계적으로 분석한 예비 연구로서 의미를 가진다. 본 연구에서 제시된 결과는 향후 дайвер 안전 장비 개발, 수중 활동 중 생리 신호 모니터링 시스템 구축, 그리고 물리치료 및 재활 분야에서의 수중 운동 적용 연구를 위한 기초 자료로 활용될 수 있을 것이다.

V. 결론

본 연구는 실제 바다 잠수 환경에서 다이버의 심박수 변화를 단계별 프로토콜에 따라 관찰한 예비 연구로, 수중 활동 단계에 따른 심박 반응의 특성을 탐색적으로 확인하고자 하였다. 연구

결과, 다이버의 심박수는 활동 강도에 따라 변화하는 경향을 보였으며, 특히 고강도 유영 구간에서 상대적으로 높은 심박 반응이 나타나는 양상이 관찰되었다. 이러한 심박 반응 패턴은 반복 측정에서도 유사한 경향을 보여, 실제 바다 환경에서도 활동 강도 변화에 따른 심박 반응의 경향성을 확인할 수 있었다. 본 연구의 결과는 향후 다이버 안전 관리 및 수중 활동 중 생리 신호 모니터링 시스템 개발을 위한 기초 자료로 활용될 수 있을 뿐만 아니라, 수중 환경을 활용한 심장 재활 및 물리치료 프로그램 설계를 위한 초기 참고 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

- Adsett JA, Mudge AM, Morris N, et al. Aquatic exercise training and stable heart failure: a systematic review and meta-analysis. *Int J Cardiol*, 186;22-28, 2015.
- Alboni P, Alboni M, Gianfranchi L. Diving bradycardia: a mechanism of defence against hypoxic damage. *J Cardiovasc Med*, 12(6);422-427, 2011.
- Becker BE. Aquatic therapy: scientific foundations and clinical rehabilitation applications. *PM&R*, 1(9); 859-872, 2009.
- Bosco G, De Marzi E, Michieli P, et al. 12-lead Holter monitoring in diving and water sports: a preliminary investigation. *Diving Hyperb Med*, 44(4);202-207, 2014.
- Bruzzi RS, Moraes MM, Martins YA, et al. Heart rate variability, thyroid hormone concentration, and neuropsychological responses in Brazilian navy divers: a case report of diving in Antarctic freezing waters. *An Acad Bras Cienc*, 94(suppl 1); e20210501, 2022.
- Cibis T, Groh BH, Gattermann H, et al. Wearable real-time ecg monitoring with emergency alert system for scuba diving. In: 2015 37th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), IEEE;6074-6077, 2015.
- Di Pumpo F, Meloni G, Paganini M, et al. Comparison between Arterial Blood Gases and Oxygen Reserve Index™ in a SCUBA Diver: A Case Report. *Healthcare*, 11(8);1102, 2023.
- Eun SJ, Kim JY, Lee SH. Development of customized diving computer based on wearable sensor for marine safety. *IEEE Access*, 7;17951-17957, 2019.
- Foster G, Sheel A. The human diving response, its function, and its control. *Scand J Med Sci Sports*, 15(1);3-12, 2005.
- Lee DW, Jung SJ, Ju JS. The effects of heliox non-saturation diving on the cardiovascular system and cognitive functions. *Undersea Hyperb Med*, 47(1);93-100, 2020.
- Lee YJ, Kim MG, Shin MJ, et al. Research on HRI Evaluation System and Diver Safety Equipment. In: OCEANS 2024-Halifax, IEEE;1-9, 2024.
- Liu JH, Song HH, Zhang HF, et al. Effects of Heart Rate Fluctuation on Aerobic Training Outcomes in Patients With Stable Coronary Artery Disease: A Prospective Study. *Cardiol Res*, 15(6);460, 2024.
- Lundell RV, Tuominen L, Ojanen T, et al. Diving responses in experienced rebreather divers: short-term heart rate variability in cold water diving. *Front Physiol*, 12;649319, 2021.
- Marabotti C, Scalzini A, Menicucci D, et al. Cardiovascular changes during SCUBA diving: an underwater Doppler echocardiographic study. *Acta Physiol*, 209(1);62-68, 2013.
- Mulder E, Schagatay E, Sieber A. First evaluation of a newly constructed underwater pulse oximeter for use in breath-holding activities. *Front Physiol*, 12;649674, 2021.
- Park TS, Kim MG, Park JH, et al. Wearable Technology in Diving: A Review of Heart Rate and Oxygen Saturation Monitoring for Enhanced Safety and Performance. *Healthcare*, 13(18);2346, 2025.
- Schaller C, Füm A, Bachmann S, et al. Heart rate profiles and heart rate variability during scuba diving. *Swiss Med Wkly*, 151(4142);w30039, 2021.
- Torres-Ronda L, i del Alcázar XS. The properties of water and their applications for training. *J Hum Kinet*, 44;237, 2014.
- Zenske A, Koch A, Kähler W, et al. Assessment of a dive incident using heart rate variability. *Diving Hyperb Med*, 50(2);157, 2020.