

# 안전하고 효율적인 수중작업을 위한 공기잠수의 계획 · 운용 · 관리

이우동\* · 김성길\*\* · 김명훈\*\*\* · 이재형\*\*\*\*†

## Air Diving Operation, Management and Planning for Safe and Effective Underwater Works

Woo Dong Lee\* · Sung Gil Kim\*\* · Myeong Hoon Kim\*\*\* · Jae Hyung Lee\*\*\*\*†

### †Corresponding Author

Jae Hyung Lee  
Tel : +82-51-410-4793  
E-mail : jhlee3416@kmou.ac.kr

Received : May 15, 2019  
Revised : June 26, 2019  
Accepted : August 12, 2019

Copyright©2019 by The Korean Society of Safety All right reserved.

**Abstract** : Underwater works are indispensable in the coastal and ocean engineering fields, and the reliance on manpower is higher than land works. Divers who work for a long time in a high-pressure underwater environment are always exposed to the risks of diving-related diseases. To prevent them, proper planning, operation, and management of diving by a supervisor with professional diving knowledge are required. This study provides the basic data for supervisors to plan, operate, and manage air diving for safe and efficient work in underwater construction sites. It is well-known that air diving simulations using the varying permeability model (VPM) require a longer decompression time as the water depth and the residence time in water increase. Therefore, it is crucial to have a proper surface interval through repetitive diving rather than single diving to improve the safety of the divers and the efficiency of underwater work. Furthermore, coastal and ocean engineers who manage and supervise underwater construction work must acquire expert knowledge on diving before they can plan, operate, and manage diving.

**Key Words** : air dive, underwater work, commercial dive, underwater safety, decompression

## 1. 서론

해안 및 항만시설의 건설, 유지, 관리에는 수중작업이 수반되기 마련이다. 대한전문건설협회의 통계에 따르면, 2019년 2월 기준, 국내 수중공사 전문건설업체는 381개이다. Table 1과 같이 공개된 최근 5년간의 수중공사 전문업체의 수와 실적만 보더라도, 해안 및 항만

공사에서 적지 않은 부분을 차지한다.

Fig. 1(a)와 같이 수중공사는 별도의 호흡 장치를 착용한 산업잠수사가 수행하며, 육상공사보다 인력 의존도가 매우 높다. 특히 기초 사석 고르기, 피복석 및 콘크리트 블록 거치에 많은 잠수사가 투입된다. Fig. 1(b)처럼 최근에는 수중공사에 중장비 사용이 증가하고 있다<sup>1)</sup>. 하지만 수중 시야가 확보되는 곳에서만 활용도가 높다. 우리나라와 같이 시야 확보가 어려운 해역에서는 적합하지 않을 뿐 아니라, 잠수사가 직접 운용하는 경우가 대부분이다.

그러한 까닭에 고압의 수중환경에서 작업하는 잠수사는 항시 잠수 관련 질환의 위험에 노출될 수밖에 없다. 특히 작업수심이 깊을수록, 수중체류 시간이 길어질수록 그 위험도는 배가된다. 그 이유는 깊은 수심일

**Table 1.** The contract performance of specialty contractors in underwater construction (2013~2017)

Year	Number	Amount [won]	Year	Number	Amount [won]
2013	1,014	1,645,272,000	2016	1,001	526,357,000
2014	911	1,485,303,000	2017	998	404,066,000
2015	962	459,554,000	-	-	-

\*경상대학교 해양토목공학과 조교수 (Department of Ocean Civil Engineering, Institute of Marine Industry, Gyeongsang National University)

\*\*PDIC-SEI/YSCUBA 아시아/한국본부 본부장 (PDIC-SEI Asia&Korea)

\*\*\*대한민국 해군 해난구조대 SSU 상사 (Sea Salvage & Rescue Unit, Republic of Korea Navy)

\*\*\*\*한국해양대학교 해양체육학과 교수 (Department of Ocean Physical Education, Korea Maritime and Ocean University)



Fig. 1. Underwater operations by diver and heavy equipment in hyperbaric environment.

수록 인체조직 내의 불활성 기체인 질소압과 환경압의 차가 커져 질소가 녹아드는 속도가 빨라진다. 또 장시간의 수중체류는 체내로 녹아드는 질소량을 증가시킨다. 상승 시에 수압(환경압)이 낮아짐으로 체내 축적된 질소가 호흡을 통해 체외로 일부 배출되지만, 여전히 인체에는 잔류질소가 남아있다. 이 잔류질소는 감압병을 발생시키는 원인이 된다. 감압병에 걸리지 않고, 안전하게 수면 밖으로 나가기 위해서는 규정된 시간 동안의 감압정지를 통해 잔류질소를 체외로 배출해야 한다. 이것은 수중공사 건설업체의 전문 잠수사도 예외가 될 수 없다. 반드시 적절한 감압절차를 지켜야 안전하게 잠수작업을 마칠 수 있다.

안전보건공단에서는 잠수작업 안전기술지침을 제정하였고<sup>2)</sup>, 10 m 이상 수심에서 호흡장치를 이용하여 작업을 행하는 것을 ‘잠수작업’이라고 정의하였다. 그러나 해안 및 항만공사 현장에서는 수심 10 m 미만에서도 장시간 반복적 잠수작업이 진행됨으로 잠수사의 안전이 담보되지 않는다. 국내에서는 이러한 현실에도 일부에서 잠수작업의 운용 및 관리에 관한 연구만이 수행되었다. 대표적 연구사례들은 U.S. Navy의 공기잠수 감압테이블을 이용하여<sup>3)</sup> 진도 장죽수로 조류발전건설의 수중작업한계에 대해 논의하였다<sup>4)</sup>. 나이트록스(nitrox)를 이용한 거가대교 침매터널 잠수작업사례를

분석하였으며, 공기잠수와 비교한 나이트록스 잠수의 능력, 경제성을 조사하였다<sup>5)</sup>. 설문조사를 통해 국내 항만건설공사에 종사하는 잠수사의 작업 현황과 환경을 조사하였다<sup>6)</sup>. 전문잠수지식을 갖춘 잠수기능장이 수중작업을 관리·감독할 수 있는 국가 자격제도의 도입을 제안하였다<sup>7)</sup>.

국외에서는 전문 잠수사의 교육 매뉴얼<sup>8)</sup> 및 규정<sup>9-11)</sup>이 제정되어 실행되고 있을 뿐 아니라, HSE(Health and Safety Executive), NOAA(National Oceanic and Atmospheric Administration), U.S. Navy에서는 잠수사의 안전을 위한 잠수기술 개발에 큰 노력을 기울이고 있다.

본 연구의 목적은 수중공사 현장관리자가 안전하고 효율적으로 수중작업을 관리·감독할 수 있는 토대를 마련하는 것이다. 이에 국내 수중공사 현장에 가장 많이 사용되는 공기잠수의 운용, 관리, 계획을 고찰하기 위하여 varying permeability model(VPM)<sup>12)</sup>을 도입·적용하여<sup>13)</sup> 잠수모의를 수행한다. 나아가 작업수심, 잠수시간에 따른 감압시간을 분석하여 안전하고 효율적인 수중작업을 수행할 수 있는 잠수조건에 대해 논의한다.

## 2. 잠수이론

### 2.1 부분압

공기잠수는 대기를 압축하여 수중에서 호흡 기체로 사용하는 잠수를 말한다. 대기는 일반적으로 질소(N<sub>2</sub>) 78.084%, 산소(O<sub>2</sub>) 20.946%, 아르곤(Ar) 0.934%, 기타 0.043%로 구성된 혼합기체이다. 그러므로 공기잠수의 호흡 기체는 불활성 기체(N<sub>2</sub>) 78%, 활성 기체(O<sub>2</sub>) 21%, 기타 1%가 혼합된 것으로 볼 수 있다.

달톤의 법칙에 따르면, 압력변화에 의한 산소와 질소의 부분압은 식 (1)과 같이 계산할 수 있다. 따라서 수심(환경압) 변화에 따른 산소와 질소의 부분압은 Fig. 2와 같다.

$$\begin{cases} PO_2 = FO_2 \times P \\ PN_2 = FN_2 \times P \end{cases} \quad (1)$$

여기서 PO<sub>2</sub>와 PN<sub>2</sub>는 산소와 질소의 부분압, FO<sub>2</sub>와 FN<sub>2</sub>는 혼합기체의 산소와 질소의 구성비, P는 절대압으로 대기압과 정수압의 합이다(압력 단위는 atm).

Fig. 2와 같이 수심이 깊을수록 증가하는 산소와 질소의 부분압은 후술하는 잠수 관련 질환에서 질소 마취와 산소중독에 큰 영향을 미친다.

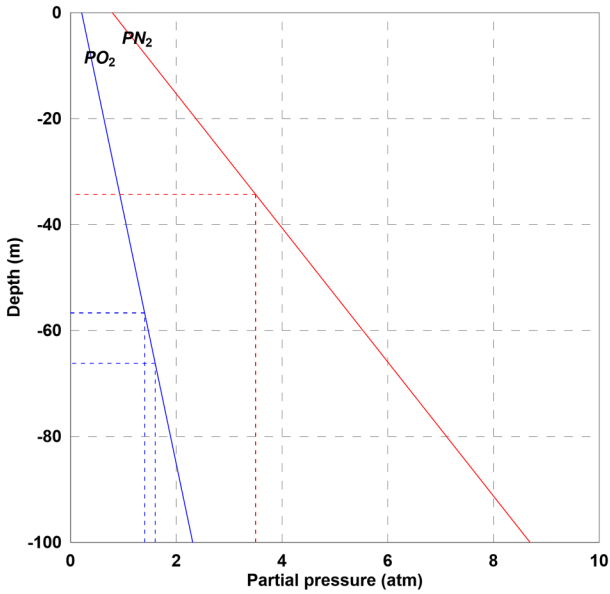


Fig. 2. The partial pressures of oxygen and nitrogen in case of air dive.

## 2.2 잠수 관련 질환

### 2.2.1 감압병

감압병(decompression sickness)은 고압 환경에서 호흡을 통해 체내에 축적된 불활성 기체인 질소를 제대로 배출시키지 못하여 인체조직에서 기포가 발생하는 병을 말한다. 다시 말해 수중의 잠수사가 급상승하면, 환경압(수압)이 갑자기 낮아지므로 과포화상태의 질소가 인체조직 또는 혈액에서 기포 형태로 변하게 된다.

기포 상태의 질소는 체내에서 다양한 증상으로 일으킨다. 혈류를 패색 시키거나, 주변 조직에 압력을 주거나,

국소 염증을 유발시킨다. 잠수사가 감압병을 예방하기 위해서는 적절한 감압절차와 안전한 상승속도를 반드시 지켜야 한다. 만약 잠수사의 부주의로 경미한 감압병 증상이라도 나타나면, 고압산소치료시설이 갖춰진 전문 의료기관으로 긴급히 이송시켜야 한다. 고압산소치료는 기포 상태의 질소를 액화시킨 후, 호흡을 통해 체외로 배출할 수 있게 도와준다.

### 2.2.2 질소 마취

질소는 우리 인체에서 쓰이지 않는 불활성 기체이므로 평상시에는 혈액과 조직에서 대기와 같은 부분압 0.79 atm을 유지한다. 따라서 폐포와 혈액의 질소 부분압의 차가 없고, 가스교환이 일어나지 않는다. 즉 들숨에 폐 속으로 들어온 질소는 폐혈관으로 녹아들지 않고, 날숨에 그대로 체외로 배출된다. 그러나 수중처럼 고압 환경에서는 흡입하는 압축공기의 질소 부분압이 혈액보다 높아 질소가 체내로 녹아든다. 녹아든 질소가 혈액을 타고 인체조직의 구석구석에 축적된다.

수심이 깊어질수록 압축공기의 질소 부분압이 높고, 인체에 축적되는 질소량도 점점 증가한다. 우리 인체에 축적된 질소농도가 낮을 때는 아무런 증상이 발생하지 않는다. 질소농도가 높아지면, 신경 세포막에 영향을 주어 신경의 정보전달기능을 마비시키는 마취작용을 일으킨다.

질소 마취증상은 개인차가 크지만, 질소 부분압(PN<sub>2</sub>)이 3.5 atm에서는 반드시 증상이 발생한다<sup>14,15</sup>. 수심 및 PN<sub>2</sub>에 따른 증상은 Table 2와 같다<sup>16,17</sup>. 수심 15 m 증가할 때마다 마티니 한 잔을 더 마신 느낌이 든다고 하여 마티니 효과(martini effect)라고 부른다. 예방법으로

Table 2. Signs and symptoms of nitrogen narcosis at different depths<sup>16-17</sup>

Depth [m]	Atmospheric pressure [atm]	PN <sub>2</sub> [atm]	Signs and symptoms of narcosis
0 - 10	1-2	0.79 - 1.58	- Unnoticeable/minor symptoms such as subtle changes in behaviour
10 - 30	2-4	1.58 - 3.16	- Mild impairment of unpractised tasks - Impaired reasoning
30 - 50	4-6	3.16 - 4.74	- Delayed response to visual and auditory stimuli - Calculation errors and poor choices - Mild amnesia - Overconfidence, idea fixation and a sense of well-being - Laughter (chambers) or anxiety (cold water)
50 - 70	6-8	4.74 - 6.32	- Impaired judgement and confusion - Hallucinations - Delay in response to signals, instructions and other stimuli - Uncontrolled laughter, hysteria (in chamber) - Feelings of terror (in some)
70 - 90	8-10	6.32 - 7.90	- Mental confusion - Loss of memory - Stupefaction and loss of judgement
90+	10+	7.90+	- Hallucinations, increased intensity of vision and hearing - Unconsciousness - Death

는 질소 마취가 발생하는 수심의 잠수를 피하고, 그 이상 수심에서는 적절한 호흡 기체를 사용하여야 한다. 가벼운 질소 마취증상은 상승하여 그 수심을 벗어나면, 바로 사라진다.

**2.2.3 산소중독**

높은 부분압의 산소를 잠복기(latent period)보다 짧은 시간 흡입 시에는 아무런 증상이 나타나지 않는다. 하지만 일정 시간 이상 높은 부분압의 산소를 흡입하면, 독성이 나타나기 시작한다. 산소 독성은 거의 모든 인체 조직에 영향을 미치며, 폐산소 산소 독성(pulmonary toxicity)과 중추신경계 산소 독성(central nervous system (CNS) toxicity)으로 구분된다. 산소 독성의 내성은 개

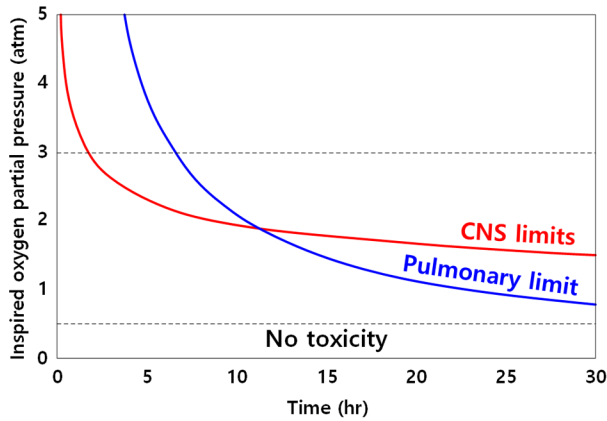


Fig. 3. The predicted human pulmonary and CNS toxicity limits of exposure to varying PO<sub>2</sub><sup>19,20</sup>.

Table 3. NOAA oxygen exposure limits<sup>22)</sup>

PO <sub>2</sub> [atm]	Oxygen exposure limits [min]	
	Single	Per 24 hr
1.60	45	150
1.55	83	180
1.50	120	180
1.45	135	180
1.40	150	180
1.35	165	195
1.30	180	210
1.25	195	225
1.20	210	240
1.10	240	270
1.00	300	300
0.90	360	360
0.80	450	450
0.70	570	570
0.60	720	720

인차가 크며<sup>18)</sup>, 일반적으로 산소 독성은 Fig. 3처럼 산소 부분압(PO<sub>2</sub>)이 증가하거나, 노출 시간이 길면 나타난다. CNS 독성은 PO<sub>2</sub>가 3 atm 이상에서 발생하고, 폐산소 독성은 PO<sub>2</sub>가 0.5 atm을 초과한 환경에 장시간 흡입 시에 발생한다<sup>19,21)</sup>.

잠수사는 고압의 수중환경에서 장시간 작업을 수행해야 하므로 산소중독의 발병 위험이 크다. 이에 NOAA에서는 산소 독성으로부터 잠수사를 보호할 목적으로 Table 3과 같이 PO<sub>2</sub>에 따른 잠수시간을 제한하고 있다<sup>22)</sup>. 일반적으로 레크리에이션 잠수단체에서는 CNS 산소 독성을 감안하여 PO<sub>2</sub>를 1.6, 산업잠수 관련 기관에서는 PO<sub>2</sub>를 1.8로 제한한다. 따라서 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 공기잠수의 제한수심은 PO<sub>2</sub>=1.6인 경우에는 약 66 m, PO<sub>2</sub>=1.8인 경우에는 약 75 m가 된다<sup>23)</sup>.

**3. 잠수모의**

**3.1 감압모델**

수중환경에서 인체에 녹아든 기체의 감압 거동을 추적할 수 있는 VPM 알고리즘이 제안되었다<sup>24)</sup>. 이후 VPM은 감압잠수에서 요구되는 감압정지를 계산할 목적으로 반복잠수, 혼합기체 등을 고려할 수 있게 확장되었다<sup>12,25)</sup>. 그리고 보일의 법칙(Boyle's law)을 적용하여 상승 시, 기포 성장을 고려할 수 있게 VPM-B로 개량되었다<sup>26)</sup>. VPM-B는 VPM보다 긴 감압시간이 요구됨으로 더 보수적인 감압모델이다. 게다가 VPM 알고리즘 기반의 감압프로그램은 포트란 소스코드로 공개되어 있다<sup>27)</sup>.

VPM는 Bühlmann의 ZH-L16 감압모델<sup>28)</sup>과 같이 수중노출 시, 16개 가상조직에 흡수/배출되는 불활성 기체의 압력변화를 직접 계산할 수 있다. VPM의 지배방정식은 다음과 같으며, 환경압 변화에 따른 가상조직 내의 불활성 기체압의 변화량을 추정한다.

$$\frac{\partial P}{\partial t} = k(P_i - P) \tag{1}$$

$$P(t) = P_0 + (P_i - P_0) \times (1 - e^{-0.693t/T_{half}}) \tag{2}$$

여기서 P는 조직의 총질소압력, t는 시간, k는 시간상수, P<sub>0</sub>는 조직의 현재 또는 초기 질소압력, P<sub>i</sub>는 주변 환경의 질소압력, T<sub>half</sub>는 조직의 반감시간이다.

본 연구에서는 수중의 환경압을 다음과 같이 정수압만을 고려한다.

$$P_{amb} = \rho gh \tag{3}$$



여기서  $P_{amb}$ 는 정수압,  $\rho$ 는 물의 밀도,  $h$ 는 수심이다.

### 3.2 잠수조건

Table 4는 NOAA에서 제안한 산소 부분압별 노출 제한시간을 나타내며<sup>22)</sup>, 이 범위 내에서 안전한 잠수작업 조건은 Table 5와 같이 설정한다. 작업수심( $D_w$ )은 10 m, 20 m, 30 m로서 모두 공기잠수가 가능하며, 각 작업수심별 잠수시간( $T_w$ )은 60 min, 120 min, 180 min, 240 min이다. 각 수심별 최대잠수시간은 240 min 이하로 NOAA<sup>20)</sup>의 기준을 준수한다. 그리고 Fig. 4는 U.S. Navy의 공기잠수 무감압 한계(NDL; no-decompression limit)을 나타내며<sup>29)</sup>,  $T_w \leq 240$  min 조건에서  $D_w=10$  m는 무감압 잠수를 진행할 수 있다. 나머지 작업수심 조건들은 적절한 감압절차를 준수해야 한다.

잠수모의에서 Table 6과 같이 잠수사의 하강 및 상승 속도는 안정성이 보장되는 범위에서 하강은 8 m/min, 첫 감압지점까지 상승은 8 m/min, 나머지는 상승은 6 m/min를 각각 적용한다. 첫 잠수는 24 hr의 수면 휴식시간( $T_s$ )을 가진 조건이다. 공기잠수이기 때문에 호흡 기체의 구성비는  $O_2$  21%,  $N_2$  78%, 기타 1%이다.

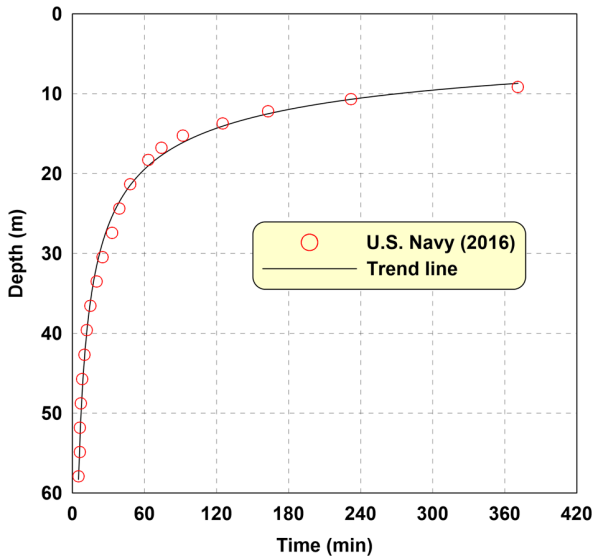


Fig. 4. The no-decompression limit for air dive<sup>29)</sup>.

Table 4. Oxygen exposure limits due to working depth

Depth [m]	PO <sub>2</sub> [atm]	Oxygen exposure limits [min]	
		Single	Per 24 hr
10	0.42	720	720
20	0.63	570	570
30	0.84	360	360
40	1.05	240	240

Table 5. Underwater working conditions

Case	Depth, $D_w$ [m]	Working time, $T_w$ [min]
1	10	60
2		120
3		180
4		240
5	20	60
6		120
7		180
8		240
9	30	60
10		120
11		180
12		240

Table 6. Diving conditions used in simulations

Diver speed [m/min]		Surface interval time [hr]	Breathing gas [%]	
Descent	Ascent		Oxygen	Nitrogen
15	8, 6	24	21	78

### 3.3 잠수모의결과

#### 3.3.1 단일 잠수

Fig. 5는 24시간의 수면 휴식 후, 1회 잠수작업을 실시한 잠수모의에서 얻어진 그래프이다. Fig. 5에서 (a), (b), (c)는 작업수심( $D_w$ )이 각각 10 m, 20 m, 30 m이고, 검정 실선은 60 min, 초록 점선은 120 min, 파란 일점쇄선은 180 min, 빨간 이점쇄선은 240 min의 작업시간( $T_w$ )을 각각 나타낸다.

Fig. 4에 나타난 U.S. Navy의 NDL에서 확인한 바와 같이  $D_w=10$  m는 Fig. 5(a)처럼 감압이 필요하지 않음을 알 수 있다. 작업시간과 관계없이 적절한 상승속도로 퇴수하면, 안전하게 잠수작업을 마칠 수 있다. 반면  $D_w=30$  m의 Fig. 5(c)에서는  $T_w > 60$  min이면, 작업시간( $T_w$ )보다 감압시간( $T_d$ )가 더 길다.  $D_w=20$  m인 Fig. 5(b)에서도  $T_w \geq 180$  min에서는 60 min 이상의 감압정지가 요구된다.

Table 7에서  $T_w=240$  min의 경우들을 비교하면, 잠수사의 안전을 위해서는  $D_w=10$  m의 경우보다  $D_w=20$  m은 1시간 34분 55초,  $D_w=30$  m은 4시간 25분 36초의 잠수시간이 더 필요하다. 그리고  $D_w=20$  m에서 240 min 이상,  $D_w=30$  m에서 180 min 이상의 수중작업에서는 총 잠수시간이 5 hr을 초과한다. 1회의 총 잠수시간이 5 hr을 초과할 경우, 잠수작업의 계획 · 운용 · 관리가 매우 어려워진다.

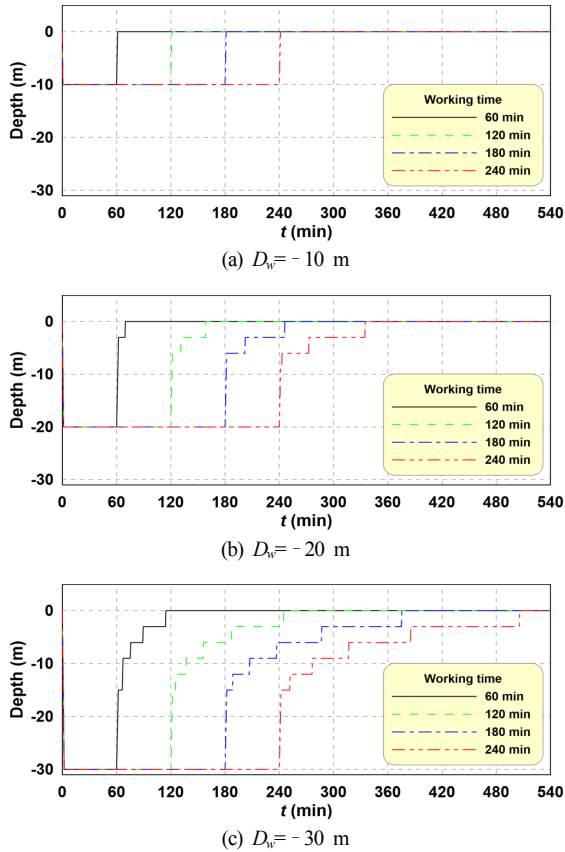


Fig. 5. Diving simulation results due to working depth and time.

Table 7. Total diving and decompression times for single dive

Depth, $D_w$ [m]	Working time, $T_w$	Decompression time, $T_d$	Total, $T_t$
-10	01:00:00	00:00:15	01:00:15
	02:00:00	00:00:15	02:00:15
	03:00:00	00:00:15	03:00:15
	04:00:00	00:00:15	04:00:15
-20	01:00:00	00:09:44	01:09:44
	02:00:00	00:38:49	02:38:49
	03:00:00	01:06:12	04:06:12
	04:00:00	01:35:05	05:35:05
-30	01:00:00	00:54:32	01:54:32
	02:00:00	02:05:03	04:05:03
	03:00:00	03:15:34	06:15:34
	04:00:00	04:25:51	08:25:51

unit: HH:MM:SS

Table 8. Total diving and decompression times for repetitive dives

Depth, $D_w$ [m]	1 <sup>st</sup> Dive		Surface time, $T_s$	2 <sup>nd</sup> Dive		Total, $T_t$
	Working time, $T_w$	Decompression time, $T_d$		Working time, $T_w$	Decompression time, $T_d$	
-10	02:00:00	00:00:15	02:00:00	02:00:00	00:00:15	06:00:30
-20		00:38:49	02:00:00		00:52:44	07:31:05
-30		02:05:03	02:00:00		03:13:54	11:18:57

punit: HH:MM:SS

### 3.3.2 반복잠수

Fig. 6은 각각의  $D_w$ 에서  $T_w=120$  min의 경우, 수면 휴식시간( $T_s$ )을 120 min 가지고, 다시  $T_w=120$  min의 반복 잠수작업을 수행한 모의결과이다. Fig. 6에서 검정 실선은  $D_w=10$  m, 파란 점선은  $D_w=20$  m, 빨간 일점쇄선은  $D_w=30$  m을 각각 나타낸다.

첫 잠수는 Fig. 5의 각  $D_w$ 에서  $T_w=120$  min일 때와 같은 결과이다.  $T_s=120$  min 동안 첫 잠수에 의한 잔류질소가 호흡을 통해 배출된다. 잔류질소의 완전한 배출은 통상  $T_s \geq 12$  hr인 것으로 알려져 있다. 따라서  $T_s=120$  min으로는 체내의 잔류질소가 완전히 배출되지 않는다. 이 잔류질소는 반복잠수에 영향을 미친다. 그 결과 Fig. 6처럼 반복잠수에서 요구되는 감압시간이 첫 잠수 때보다 증가한다.

Table 8로부터  $T_s=120$  min으로는 완전한 잔류질소 배출이 되지 않았음에도  $D_w=20$  m 조건에서는 첫 잠수에 비해 반복잠수의 감압시간이 많이 증가하지 않는다. 이것은  $D_w=20$  m에서 많은 양의 질소가 체내에 녹아들지 못했을 뿐 아니라, 수면 휴식을 통해 잔류질소가 호흡으로 대부분 체외로 배출되었기 때문이다. 하지만  $D_w=30$  m의 조건에서는 첫 잠수의 잔류질소가 완전히 배출되기에  $T_s=120$  min는 턱없이 짧은 시간이다. 그 까닭에 반복잠수의 감압시간( $T_d$ )이 첫 잠수에 비해 약 1.5 배 길다. 그 결과 2시간 2회 잠수작업에 총 11시간 18분 57초가 소요된다. 이처럼 장시간이 요구되는 잠수작업을 계획하고, 운용·관리하는 것은 잠수사의 안전을 위해 지양되어야 한다.

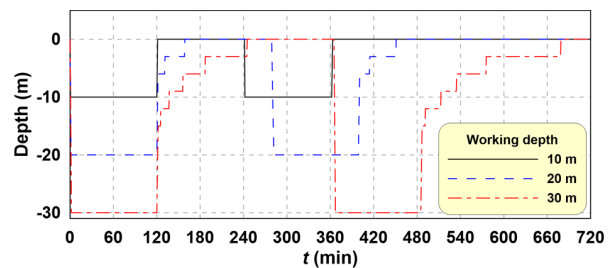


Fig. 6. Diving simulation results due to repetitive dives.

#### 4. 토의 및 결론

본 연구에서는 안전하고 효율적인 수중작업을 수행할 수 있게 국내의 산업잠수 분야에서 대부분을 차지하는 공기잠수의 계획, 운용, 관리, 계획에 대해 고찰하였다. 이를 위해 VPM<sup>12)</sup>을 이용한 잠수모의를 진행하였으며, 이상적인 잠수조건에서 얻어진 주요한 결론을 다음과 같다.

1) VPM을 이용하여 공기잠수모의를 수행하였으며, Table 7과 Table 8처럼 작업수심이 깊을수록, 작업시간(수중체류 시간)이 길어질수록 감압시간 및 총 잠수시간이 많이 증가하였다.

2) 작업수심 20 m에서는 4시간 이상, 작업수심 30 m에서는 3시간 이상 작업시간 조건에서 총 잠수시간이 5시간을 초과하였다.

3) 장시간의 단일 잠수작업은 긴 감압시간이 필요하며, 반복잠수를 통해 일부 극복할 수는 있다. 그러나 작업수심 30 m 조건에서는 큰 효과를 볼 수 없었다.

이상의 결론에 근거하여 잠수사의 안전과 직결되는 잠수 관련 질환과 수심별 O<sub>2</sub>와 N<sub>2</sub>의 부분압과의 상관관계를 이해할 수 있었다. 적절한 감압잠수를 통해 잠수사의 안전을 충분히 도모할 수 있다. 그러나 전문 잠수지식이 없는 현장관리자가 잠수작업을 계획하고, 운용·관리하는 것이 사실상 불가능하다. 따라서 국내에서도 안전하고, 효율적인 수중작업을 수행하기 위해 전문 잠수지식을 갖춘 현장관리자가 절실히 요구된다.

본 연구는 이상적 잠수조건을 적용하여 얻어진 모의 결과이며, 공기잠수가 적용되는 수중작업의 계획을 세우는데 참고할 수 있다. 실제 수중공사 현장에서는 현장여건, 수중환경, 잠수장비, 잠수사의 상태 등을 충분히 고려하여 관리자가 수중작업의 계획·운영·관리를 수행하여야만 잠수사의 안전이 담보될 수 있다.

향후 파랑, 흐름, 조석과 같은 해양물리력을 직접 추정할 수 있는 수치모델<sup>30-32)</sup>과 감압모델(VPM)의 연성해석을 수행하여 수중작업환경(파랑, 흐름, 염분, 수온, 탁도 등)<sup>33-36)</sup>을 고려한 잠수모의를 수행할 예정이다.

**감사의 글:** 이 연구는 경상대학교 해양산업연구소의 2018년도 신진연구회 사업에 의하여 수행되었음.

#### References

1) D. Won, I. S. Jang and C. Shin, "Investigation on Construction Process and Efficiency of Underwater Construction Equipment for Rubble Mound Leveling

Works", Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society, Vol. 17, No. 5, pp. 372-378, 2016.

2) KOSHA (Korea Occupational Safety & Health Agency), "Diving Work Safety Guidelines", KOSHA Guide, B-4-2011, 30p, 2011.

3) U.S. Navy, "U.S. Navy Diving Manual", Revision 5. SS521-AG-PRO-010, Naval Sea Systems Command, U.S. Navy, 538p, 2005.

4) W. S. Kim, "Critical Limits of Commercial Diving on the Construction of Tidal Current Power in Jangjuk Channel", Journal of Fisheries and Marine Sciences Education, Vol. 25, No. 3, pp.733-742, 2013.

5) D. H. Woo, S. Y. Kang and M. G. Lee, "A Case Study of Nitrox Usage in Diving Operation of the Busan-Geoje Fixed Link Immersed Tunnel", Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety, Vol. 21, No. 6, pp. 790-797, 2015.

6) H. Park, "A Study on the Safe Work for Industrial Diver Engaged in Port Construction Work", Master's Thesis, Pukyong National University, Korea, 59p, 2016.

7) K. B. Sim, J. H. Cha and S. Y. Kang, "Analysis of the Commercial Diving National Qualification System for the Introduction of a Diving Supervisor", Journal of the Korean Society of Marine Engineering, Vol. 40, No. 7 pp. 655-662, 2016.

8) J. T. Joiner, "Commercial Diver Training Manual", Best Publishing, 362p, 2007.

9) HSE (Health and Safety Executive), "Commercial Diving Projects Offshore", Diving at Work Regulations 1997, Approved Code of Practice and guidance (ACOP), L103, 1998.

10) IMCA, "International Code of Practice for Offshore Diving", International Marine Contractors Association, IMCA D 014, Revision 2, 79p, 2014.

11) ADCI (Association of Diving Contractors International), "International Consensus Standards for Commercial Diving and Underwater Operations", Association of Diving Contractors International, 6.2 Edition, 352p, 2016.

12) D. E. Yount, E. B. Maiken and E. C. Baker, "Implications of the Varying Permeability Model for Reverse Dive Profiles", Proceedings of the Reverse Dive Profiles Workshop (Washington D.C., USA), Smithsonian Institution, pp. 29-61, 2000.

13) W. D. Lee, J. Lee and J. H. Lee, "Applicability of Nitrox Diving for Improved Safety and Efficiency of Underwater Operations", Journal of Coastal Research, Special Issue No.

- 91(Under review), 2019.
- 14) A. R. Behnke, R. M., Thompson and E. P. Motley, “The Psychologic Effects from Breathing Air at 4 Atmospheres Pressure”, *American Journal of Physiology*, Vol. 112, pp. 554-558, 1935.
  - 15) P. B. Bennett, “Inert Gas Narcosis and HPNS. In: Bove A.A., editor. *Bove and Davis' Diving Medicine*”, 4th Edition, Philadelphia, Saunders, pp. 225-240, 2004.
  - 16) J. Lippmann and S. Mitchell, “Nitrogen Narcosis, Deeper into Diving, 2nd Edition. *The Divers Alert Network, DAN*, 512p, 2005.
  - 17) D. Z. Levett and I. L. Millar, “Bubble Trouble: A Review of Diving Physiology and Disease”, *Postgraduate Medical Journal*, Vol. 84, pp. 571-578, 2008.
  - 18) C. Edmonds, B. McKenzie and R. Thomas, “*Diving Medicine for Scuba Divers*”, JL Publications, 316p, 1992.
  - 19) N. Bitterman, “CNS Oxygen Toxicity”, *Undersea and Hyperbaric Medicine, UHM*, Vol. 31, No. 1, pp. 63-72, 2004.
  - 20) C. J. Lambertsen, “Definition of Oxygen Tolerance in Man (Predictive Studies V)”, *Institute For Environmental Medicine University of Pennsylvania Medical Center Philadelphia, Final Report, ADA239247*, 61p, 1987.
  - 21) A. Chawla and AK. Lavania, “Oxygen Toxicity”, *Medical Journal Armed Forces India*, Vol. 57, No. 2, pp. 131-3, 2001.
  - 22) NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration), “NOAA diving manual: Diving for science and technology”, 5th Edition. US Department of Commerce, Best Publishing Company, NOAA Diving Office, 875p, 2013.
  - 23) J. B. Lee, J. H. You, S. Shon, T. M. Sung and K. J. Paeng, “Case on the Death of Scuba Diver by Analyzing the Air in Nitrox Cylinder”, *Journal of the Korean Society of Safety*, Vol. 26, No. 2, pp. 42-47, 2011.
  - 24) D. E. Yount, “Skins of Varying Permeability: A Stabilization Mechanism for Gas Cavitation Nuclei”, *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 65, pp. 1429-1439, 1979.
  - 25) D. E. Yount and D. C. Hoffman, “On the Use of A Bubble Formation Model to Calculate Diving Tables“, *Aviation, Space, and Environmental Medicine, ASEM*, Vol. 57, No. 2, pp. 149-156, 1986.
  - 26) E. C. Baker, “VPM-B Program Update Explanation”, Available at <ftp.decompression.org>, 2002.
  - 27) E. C. Baker, “VPM-B Fortran Source Code”, Available at <ftp.decompression.org>, 2003.
  - 28) A. A. Buhlmann, “*Decompression-Decompression Sickness*”, Berlin New York: Springer-Verlag, 87p, 1984.
  - 29) U.S. Navy, “U.S. Navy Diving Manual”, Revision 7. SS521-AG-PRO-010, Naval Sea Systems Command, U.S. Navy, 987p, 2016.
  - 30) W. D. Lee, H. S. Jeon, J. R. Park D. S. Hur, “Effects of Wave-Current Interactions on 3-D Flow Fields in a River Mouth”, *Journal of Ocean Engineering and Technology*, Vol. 31, No. 1, pp. 36-46, 2017.
  - 31) W. D. Lee, J. O. Kin D. S. Hur, “Effects of Waveform Distribution of Tsunami-Like Solitary Wave on Run-up on Impermeable Slope”, *Journal of Ocean Engineering and Technology*, Vol. 33, No. 1, pp. 76-84, 2019.
  - 32) C. G. Song, I. S. Woo and T. K. Oh, “Analysis of Velocity Structures and Shear Stresses by Parameters and Internal Boundary Conditions of Depth-averaged Flow Model”, *Journal of the Korean Society of Safety*, Vol. 28, No. 5, pp. 54-60, 2013.
  - 33) W. D. Lee, Y. H. Jeong and D. S. Hur, “Effects of Wave Action on Seawater Intrusion in Coastal Aquifer and Mitigation Strategies”, *Journal of Ocean Engineering and Technology*, Vol. 31, No. 1, pp. 47-59, 2017.
  - 34) T. W. Kim, H. S. Yang, B. W. Park and J. S. Yoon, “Study on Water Level and Salinity Characteristics of Nakdong River Estuary Area by Discharge Variations at Changnyeong-Haman Weir(1)”, *Journal of Ocean Engineering and Technology*, Vol. 32, No. 5, pp. 361-366, 2018.
  - 35) J. Lee, J. Yoon and T. Ha, “Calculation of Nonlinear Energy Transfer in 3<sup>rd</sup> Generation Wave Models”, *Journal of Ocean Engineering and Technology*, Vol. 31, No. 6, pp. 405-412, 2017.
  - 36) B. Park, J. H. Jung, S. C. Hwang, S. K. Cho, D. Jung and H. G. Sung, “Wind Tunnel Test of Wind Loads and Current Loads Acting on FLBT and LNG Bunkering Shuttles in Side-by-side Configuration and Comparison with Empirical Formula”, *Journal of Ocean Engineering and Technology*, Vol. 31, No. 4, pp. 266-273, 2017