

안전한 수중작업을 위한 최적 나이트록스 고찰 : 잠수모의 평가

이우동*

A Study on Optimal Nitrox for Safe Underwater Works: Diving Simulation-Based Assessments

Woo Dong Lee**†

†Corresponding Author

Woo Dong Lee
Tel : +82-55-772-9126
E-mail : wdlee@gnu.ac.kr

Received : October 24, 2019
Revised : December 2, 2019
Accepted : December 3, 2019

Copyright©2020 by The Korean Society
of Safety All right reserved.

Abstract : Nitrox diving was introduced by the NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) to increase the oxygen content and lower the nitrogen content in respiratory gases. The commercial diving sector specializing in underwater operations has recently introduced regulations on the use of Nitrox. Because the respiratory gas for Nitrox diving has a lower nitrogen content than the normal air, the amount of nitrogen dissolved in the body is small, which not only significantly reduces the decompression time compared to air diving, but also reduces the chance of exposure to decompression sickness. In this study, we applied the VPM (Varying Permeability Model) algorithm to virtual diving with air and Nitrox as a respiratory gas, respectively, to study the optimal Nitrox diving for the safety at the underwater works. The results showed that Nitrox diving had a longer NDL (No-Decompression Limit), a much shorter depression time. In other words, Nitrox diving in underwater works is safer from decompression sickness than commonly used air diving.

Key Words : nitrox diving, underwater work, commercial dive, decompression model, underwater safety

1. 서론

안전보건공단이 제정한 잠수작업 안전기술지침¹⁾에 따르면, 수심 10 m 이상에서 별도의 호흡장치를 이용하여 행하는 작업을 ‘잠수작업’이라 한다. 수중환경에 노출되는 잠수작업자는 항시 잠수 관련 질환의 위험에 노출되며, 수중 체류시간이 길어질수록, 작업수심이 깊을수록 그 위험도는 배가된다. 이처럼 수중작업은 고압환경에서 진행되기 때문에 육상보다 철저한 안전관리가 요구된다.

레크리에이션을 포함한 대부분의 잠수는 산소 21%, 질소 78%로 구성된 공기를 호흡기체로 사용한다. 이 공기잠수는 대수심 환경에 노출되거나, 수중 체류시간이 길어질 경우, 인체조직으로 녹아드는 질소량이 급격히 증가한다. 상승 시에는 환경압 감소로 체내의 질소가 호흡을 통해 몸 밖으로 일부 배출된다. 그러나 잠

압병에 걸리지 않기 위해서는 일정시간, 적정수심에 머무르며, 잔류질소를 체외로 배출하는 감압과정을 거쳐야 한다. 만일, 잠수작업자가 적절한 감압절차를 지키지 않으면, 심각한 인체 손상이 나타날 수 있다. 감압병 증상이 심하면, 사망에 이르기도 한다. 다시 말해 공기잠수로 대수심 또는 장시간의 잠수작업을 수행하는 것이 어렵다는 의미이기도 하다.

잠수작업자의 주요 사망원인은 감압병과 동맥 공기색전증이다. 보통 산업잠수에서는 1/200 정도의 사망사고율을 나타내는 것으로 알려져 있다²⁾. 그리고 우리나라 스쿠버 잠수의 사망율은 1997-2003년 평균 1/47,619로 미국과 일본보다 2배 정도 높다³⁾. 스쿠버 잠수보다 238배나 높은 산업잠수의 사망사고율을 줄이고, 잠수작업의 안정성을 확보할 수 있는 근본대책이 요구된다.

1970년대 NOAA에서 산소비를 높이고, 질소비를 낮춘 호흡기체가 도입되었다. 이것을 질소(Nitrogen)와 산

*국립경상대학교 해양토목공학과 조교수 (Department of Ocean Civil Engineering, Gyeongsang National University)

소(Oxygen)의 합성어로 나이트록스(Nitrox)라 부른다. 산소비율이 21% 이상의 나이트록스를 EANx(Enriched Air Nitrox)로 표기하고, 산소비율이 32%, 36%인 EAN32와 EAN36을 주로 사용한다. 한편, 레크리에이션 잠수에서는 나이트록스의 안정성이 충분히 검증되었다. 그러나 장시간 잠수작업을 전문적으로 수행하는 산업잠수에서는 나이트록스 사용에 대한 규정이 최근에서야 제정되었다^{4,5)}. 나이트록스는 공기보다 질소비가 낮기 때문에 잠수작업자의 체내에 축적되는 질소량이 작아진다. 즉, 나이트록스 잠수는 공기잠수에 비해 감압시간을 획기적으로 줄일 수 있다. 따라서 다이버 체내에 질소가 과다 축적되어 발생하는 감압병의 위험이 감소하게 된다. 하지만 나이트록스 잠수는 호흡기체의 산소비가 높아 공기잠수에 비해 산소중독에 노출될 확률이 높다. 호흡기체의 산소부분압에 따른 한계수심을 정확하게 파악하고, 나이트록스 잠수작업계획을 수립하여야 한다.

국외에서는 산업잠수의 교육 매뉴얼⁶⁾ 및 규정^{4,5,7)}이 제정되었다. 그뿐만 아니라 HSE(Health and Safety Executive), NOAA, U.S. Navy과 같은 국가기관에서 다이버 안전을 위한 잠수기술 개발에 큰 노력을 기울이고 있다. 우리나라에서는 산업잠수에 관한 연구가 극히 일부에서 수행되고 있다⁸⁻¹⁰⁾. 나이트록스 잠수에 관한 연구로서는 거가대교 침매터널 잠수작업사례를 분석하여 공기잠수와 비교한 나이트록스 잠수의 능력, 경제성을 조사하였다¹¹⁾. 그리고 나이트록스 기체 분석을 통해 다이버의 사망원인을 추정에 관한 사례연구가 수행되었다¹²⁾. 최근, 안정성이 검증된 감압모델 VPM(Varying Permeability Model)¹³⁾을 이용하여 EAN32, EAN36의 적용성을 평가하였다¹⁴⁾. 또한, 작업수심, 잠수시간에 따른 감압시간을 분석하여 안전하고 효율적인 수중작업을 위한 공기잠수의 계획, 운용, 관리에 관한 연구도 진행되었다¹⁵⁾.

본 연구에서는 안전한 수중작업을 위한 나이트록스 잠수의 적용성을 검토하기 위해 VPM¹³⁾을 이용하여 잠수모의 평가를 수행한다. 나아가 작업수심에 따른 최적 나이트록스가 감압시간에 미치는 영향을 분석하여 잠수작업의 안정성을 분석한다.

2. 잠수이론에 관한 고찰

2.1 부분압

Fig. 1과 같이 달톤의 법칙(식 (1))을 적용하여 수심에 따른 공기의 산소와 질소의 부분압을 계산할 수 있다. Fig. 1에서 수심이 깊을수록 수압이 증가함에 따라

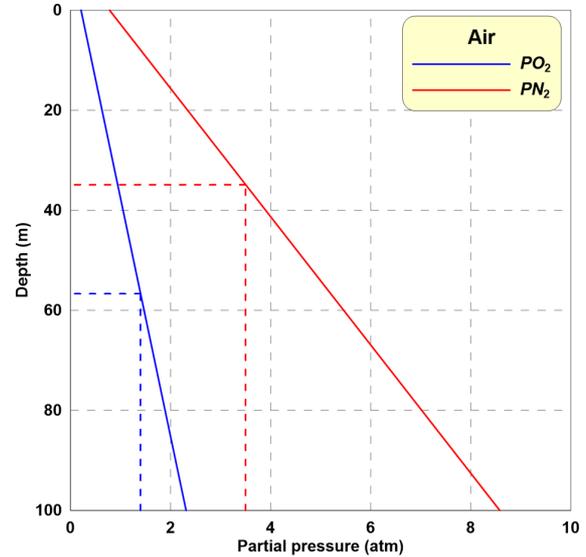


Fig. 1. Partial pressures of oxygen and nitrogen due to water depth for air diving.

공기 밀도가 높아짐으로 질소와 산소의 부분압 역시 증가한다.

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

여기서 PO_2 는 산소 부분압, PN_2 는 질소 부분압, FO_2 는 산소비, FN_2 는 질소비, p 는 절대압력이다.

2.2 가스교환

인간의 생명유지를 위한 영양소 연소에는 산소가 필요하고, 부산물로 이산화탄소 생성된다. 그 결과, 인체의 산소 부분압은 떨어지고, 이산화탄소 부분압은 높아진다. 이 부분압 차로 인해 폐포-혈액에서는 외호흡, 조직-혈액에서는 내호흡을 통한 가스교환이 발생한다. 이 가스교환을 통해 산소는 체내로 유입되고, 이산화탄소는 체외로 배출된다.

불활성기체인 질소는 인체에서 소모되지 않는다. 그러므로 인체와 대기 사이의 부분압 차가 발생하지 않고, 가스교환도 없다. 고압의 수중환경으로 다이버가 들어가면, 상황은 달라진다. 수압에 의해 호흡기체의 질소 부분압이 증가하여 가스교환(내/외호흡)을 통해 질소가 인체에 녹아든다.

예를 들어, 수심 30 m에 다이버가 있다면, 수압(약 4 기압)의 영향으로 수면보다 4배 많은 질소가 체내로 더 빨리 녹아든다. 인체가 포화될 때까지 지속적으로 질소가 흡수된다. 이와 반대로 다이버가 상승하거나, 물 밖으로 나오면, 환경압의 질소 부분압보다 체내의

부분압이 높아진다. 이로 인해 체액과 조직에 녹아든 질소가 내호흡과 외호흡을 통해 체내·외의 질소 부분압이 같아질 때까지 호흡을 통해 배출된다.

2.3 잠수질환

2.3.1 감압병

수중에서 다이버의 폐로 유입된 산소와 질소는 혈액과 인체조직으로 녹아든다. 산소는 신진대사를 통해 일부 소모되나, 질소는 인체에 그대로 남게 된다. 감압병은 체외로 배출되지 못한 액화 질소가 상승 시에 체액이나 조직에서 기화되어 발병한다. 증상으로는 관절 부근의 말초신경을 자극해서 일어나는 관절통과 피부홍반, 혈액속 기포에 의한 폐전색, 흉통, 호흡곤란, 기침, 중추신경마비 등 다양하게 나타난다.

다이버가 감압병으로부터 자유로우려면, 적절한 상승속도와 감압절차를 반드시 준수해야 한다. 그리고 경미한 증상이라도 나타나면, 바로 고압산소치료시설이 갖추어진 의료기관을 방문해야 한다.

Table 1. NOAA oxygen exposure limits²⁰⁾

(PO_2) _{max}	Maximum single exposure [min]	Maximum per 24 hr [min]
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

2.3.2 산소중독

신진대사에 꼭 필요한 산소가 인체에 항상 좋은 작용만 하는 것이 아니다. 고농도 산소를 잠복기보다 짧은 시간 흡입할 때는 아무런 독성이 나타나지 않지만, 일정시간 이후에는 독성을 나타낸다. 아직, 산소중독의 정확한 기전은 알려지지 않았다. 그러나 고농도 산소가 폐와 뇌세포의 생화학적 효소반응을 억제하여 세포 파괴가 나타난다. 결국, 폐가 딱딱해져 호흡부전과 뇌의 신경전달물질 감소로 인한 발작이 일어난다. 산소

중독의 내성은 개인차가 크지만¹⁶⁾, 모든 인체조직에 영향을 미친다. 중추신경계 산소중독은 $PO_2 \geq 3$ 조건에서 발생하고, 폐 산소중독은 $PO_2 > 0.5$ 조건에 장시간 흡입 시에 발생한다^{17,18)}.

레크리에이션 잠수단체에서는 중추신경계 산소중독을 감안하여 산소 부분압의 허용한계($(PO_2)_{max}$)를 1.4~1.6로 규정한다. 산업잠수 단체는 $(PO_2)_{max}=1.8$ 로 제한한다. 다이버가 고압의 수중환경에서 장시간 노출되면, 산소중독의 발병 위험이 크게 높아진다. 이에 NOAA에서는 다이버의 안전확보하기 위해 $(PO_2)_{max}$ 에 따른 잠수시간을 Table 1처럼 제한하였다²⁰⁾.

2.3.3 질소마취

인체에서 소모되지 않는 불활성 기체는 대기의 부분압과 혈액 및 조직의 부분압이 일정하게 유지된다. 전술처럼 불활성 기체 질소의 가스교환은 일어나지 않는다. 그러나 잠수작업 중에서는 혈액보다 호흡기체의 질소 부분압이 높아 폐포에서 질소가 혈액으로 녹아든다. 이 질소는 혈액순환을 통해 인체 구석구석에 축적된다.

작업수심이 깊을수록 호흡기체의 질소 부분압은 높아지고, 축적되는 질소량도 증가한다. 우리 인체는 질소농도가 낮을 때에는 어떠한 증상도 나타나지 않지만, 일정 이상에서는 신경 세포막에 영향을 미쳐 신경의 정보전달기능을 마비시킨다. 이것을 질소마취라고 부른다. 질소마취 증상 역시 개인차가 크다. 그러나 Fig. 1과 Fig. 2에 표시된 $PN_2 \geq 3.5$ 의 작업수심에서는 모든 다이버에서 질소마취 증상이 나타난다^{21,22)}.

질소마취 증상은 몸이 나른해지고, 술에 취한 것처럼 정신이 몽롱해져 판단력이 흐려진다. 질소마취가 잠수 사망사고의 직접적인 원인이 되는 경우 드물지만, 간접적인 원인을 제공하는 경우는 심심치 않게 찾아볼 수 있다³⁾. 예방법으로는 다이버가 질소마취를 인지하고, 그 수심영역에서 벗어나면, 후유증 없이 곧바로 회복된다.

2.2 나이트록스 잠수

나이트록스는 공기보다 산소비는 높고, 질소비는 낮은 혼합기체를 말한다. 따라서 나이트록스 잠수는 무감압 한계시간(NDL; No-Decompression Limit)을 늘리거나, 감압시간을 줄일 수 있다. 그러나 공기보다 높은 산소 부분압으로 인한 산소독성의 위험 때문에 작업수심과 잠수시간의 제약을 받을 수 있다. 즉, 나이트록스 잠수는 높은 산소 부분압 흡입으로 인해 공기잠수보다 중추신경계 산소중독에 쉽게 노출된다.

달톤의 법칙(식 (1))을 적용하여 잠수 수심에 따른

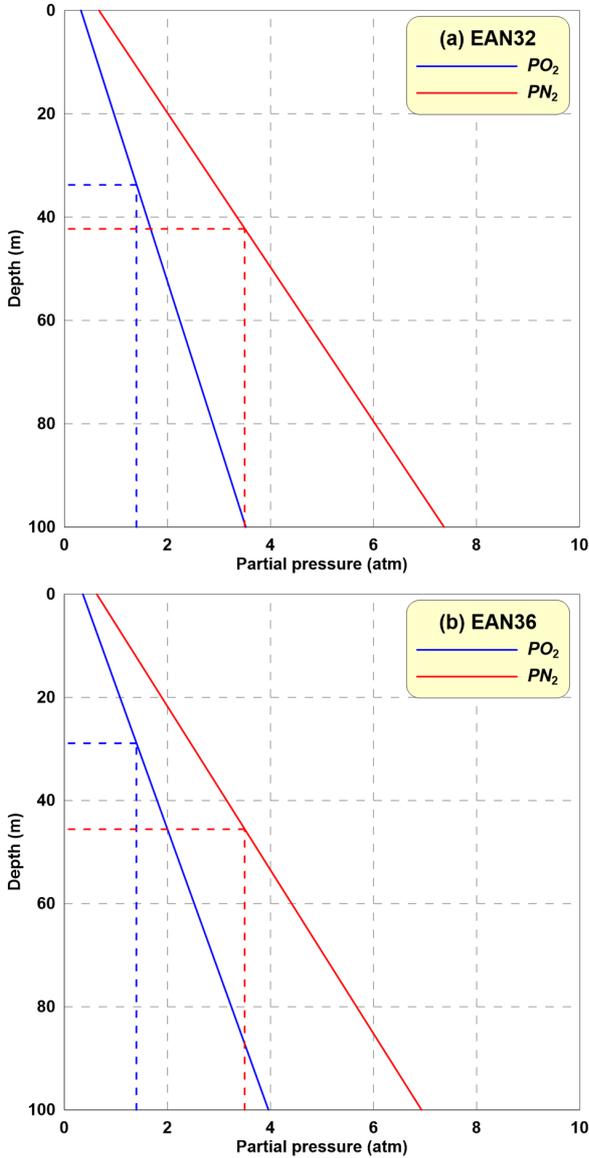


Fig. 2. The partial pressures of oxygen and nitrogen due to water depth for nitrox diving.

EAN32, EAN36의 부분압 분포는 Fig. 2와 같다.

Fig. 2로부터 나이트록스 역시 수심이 깊어질수록 호흡기체 밀도가 커짐에 따라 산소/질소 부분압도 증가한다. 공기보다 산소비가 높고, 질소비가 낮기 때문에 나이트록스(EAN32, EAN36)의 산소 부분압 기울기는 급하고, 질소 부분압 기울기는 완만하다. 이 같은 산소와 질소의 부분압 분포는 전술한 잠수질환에 큰 영향을 미친다.

다이버의 호흡기체에 따른 최대작업수심(MOD; Maximum Operation Depth)은 다음 식 (2)에 $(PO_2)_{max}$ 를 대입하여 계산할 수 있다. $(PO_2)_{max}$ 조건에 따른 MOD는 Fig. 3과 같다.

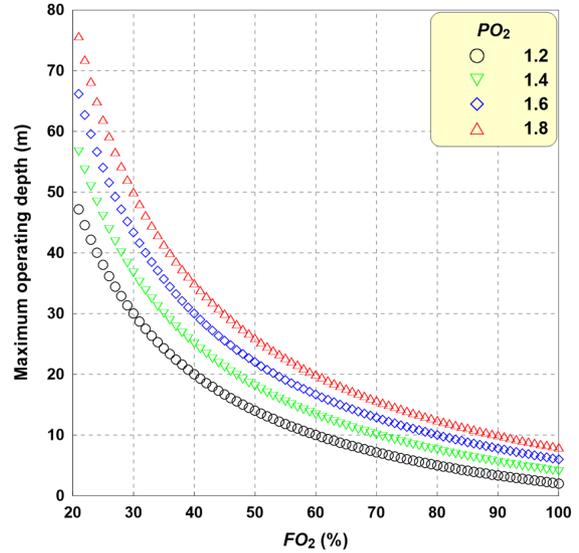


Fig. 3. The partial pressures of oxygen and nitrogen due to water depth in nitrox diving.

Table 2. Maximum operating depth

$(PO_2)_{max}$	Gas	Nitrox		
		Air	EAN32	EAN36
1.2	Air	47.14	27.50	23.33
1.4	Air	56.67	33.75	28.89
1.6	Air	66.19	40.00	34.44
1.8	Air	75.71	46.25	40.00

unit: m

$$MOD = 10 \left[\frac{(PO_2)_{max}}{FO_2} - 1 \right] \quad (2)$$

식 (2)를 이용하여 $(PO_2)_{max}$ 조건에 따른 MOD를 나타내면(Fig. 3과 Table 2 참조), 나이트록스가 공기보다 FO_2 가 크므로 MOD가 더 작다. 또한, Fig. 1과 Fig. 2의 PO_2 분포에서 $(PO_2)_{max}=1.4$ 의 MOD를 확인할 수 있다.

공기환산수심(EAD; Equivalent Air Depth) 산정식 (3)을 이용하여 나이트록스 잠수와 공기잠수의 상관관계를 이해할 수 있다. 즉, 나이트록스 잠수의 감압은 잠수수심보다 낮은 공기잠수의 감압절차와 같고, NDL도 같다. 다이빙 컴퓨터가 일반적으로 보급되지 않은 과거에는 나이트록스 잠수의 EAD 계산 후, 공기 감압테이블을 이용하기도 하였다.

$$EAD = FN_2 \frac{(10+h)}{(FN_2)_{air}} - 10 \quad (3)$$

여기서 h 는 수심, $(FO_2)_{air}$ 는 공기의 질소비이다.

3. 잠수모의 평가

3.1 감압모델

VPM은 실험실에서 압력에 노출된 수중생물의 제라틴에서 기포 형성 및 성장을 모델링하기 위해 개발되었다. 이후, 다이버 인체로 녹아드는 기체의 감압 거동을 추정하기 위해 VPM 알고리즘이 제안되었다²³⁾. 감압잠수에 필요한 감압정지를 계산하는데, 매우 유용한 알고리즘이다. 현재, 반복잠수, 혼합기체 영역까지 확장되었다^{13,24)}. 최근에는 다이버 상승 시에 기포 성장을 고려하기 위한 보일의 법칙(Boyle's law)을 적용한 VPM-B가 제안되기도 하였다²⁵⁾. VPM-B의 감압시간은 VPM보다 길기 때문에 조금 더 보수적이라고 할 수 있다. 따라서 VPM은 레크리에이션 잠수뿐 아니라, 테크니컬, 산업잠수 분야까지 폭넓게 적용되고 있다.

본 연구에서는 포트란 소스코드로 공개된 VPM 알고리즘 기반의 감압프로그램을 이용하여 잠수모의를 진행한다²⁶⁾. VPM는 Bühlmann의 ZH-L16 감압모델²⁷⁾처럼 수중에서 16개 가상조직에 흡수/배출되는 불활성 기체의 압력변화를 직접 계산한다. VPM의 지배방정식은 다음과 같으며, 수압에 따라 가상조직의 불화성 기체압력 변화량을 추정하게 된다.

$$\frac{\partial P}{\partial t} = k(P_i - P) \quad (4)$$

$$P(t) = P_0 + (P_i - P_0) \times (1 - e^{-0.693t/T_{half}}) \quad (5)$$

여기서 P 는 조직의 총 질소압력, t 는 시간, k 는 시간상수, P_0 는 조직의 현재 또는 초기 질소압력, P_i 는 주변 환경의 질소압력, T_{half} 는 조직의 반감시간이다.

본 연구에서는 수중 환경압을 다음의 정수압 산정식을 적용한다.

$$P_{amb} = \rho gh \quad (6)$$

여기서 P_{amb} 는 정수압, ρ 는 물의 밀도, h 는 수심이다.

3.2 잠수조건

산소 부분압의 허용한계에 따른 NOAA의 잠수제한 시간²⁰⁾을 고려하여 Table 3의 잠수작업조건을 설정한다(Table 1 참조). 여기서 작업시간(T_w)은 120분이고, 최대수심 40 m를 기준으로 5 m 간격으로 작업수심(h_w)을 설정한다.

최적 나이트록스는 다이버 안전을 고려하여 산소 부분압 허용한계가 조금 보수적인 $(PO_2)_{max}=1.4$ 를 적용한

Table 3. Underwater working conditions

Gas	Working depth, h_w [m]	Working time, T_w [min]
Air, Nitrox	5, 10, 20, 25, 30, 35, 40	120

Table 4. Nitrox conditions due to working depth

h_w [m]	5	10	15	20	25	30	35	40
EANx	93	69	55	46	39	34	30	27
ΔFO_2	0.72	0.48	0.34	0.25	0.18	0.13	0.09	0.06

Table 5. Diving conditions used in diving simulations

Movement speed [m/min]		Surface interval time [hr]
Descent	Ascent	
15	8, 6	24

다. h_w 별 EANx와 산소비 차(ΔFO_2)는 Table 4와 같다.

$FO_2=0.21$ 의 공기보다 FO_2 가 크나, h_w 가 클수록 산소 중독 발병위험이 증가하기 때문에 ΔFO_2 는 작아진다.

잠수모의에서 Table 5처럼 다이버의 안정성이 보장될 수 있게 하강속도는 8 m/min, 첫 감압지점까지 상승은 8 m/min, 나머지는 상승은 6 m/min를 각각 적용한다. 그리고 24시간 수면 휴식을 가진 다이버가 잠수작업을 수행하는 조건이다.

3.3 잠수모의 결과

3.3.1 무감압 잠수

24시간 수면 휴식 후, Table 3의 잠수작업조건과 Table 4의 나이트록스 잠수조건에 대한 NDL과 EAD는 Table 6과 같다.

Table 6. NDLs and EADs due to breathing gas conditions

h_w [m]	Air	Naitrox	EAD [m]	EANx
5	○	○	0	93
10	○	○	0	69
15	×	○	4	55
20	×	○	10	46
25	×	×	17	39
30	×	×	23	34
35	×	×	30	30
40	×	×	36	36

공기잠수의 경우, 작업수심 $h_w \leq 10$ m 조건에서 작업시간 $T_w=120$ min을 가져도 감압이 필요하지 않다. 최적 나이트록스는 $h_w \leq 20$ m 조건에서 무감압 잠수를 진행할 수 있다. 나이트록스는 공기보다 FO_2 가 크므로 잠수작업 중에 체내로 녹아드는 질소량이 적고, 녹아

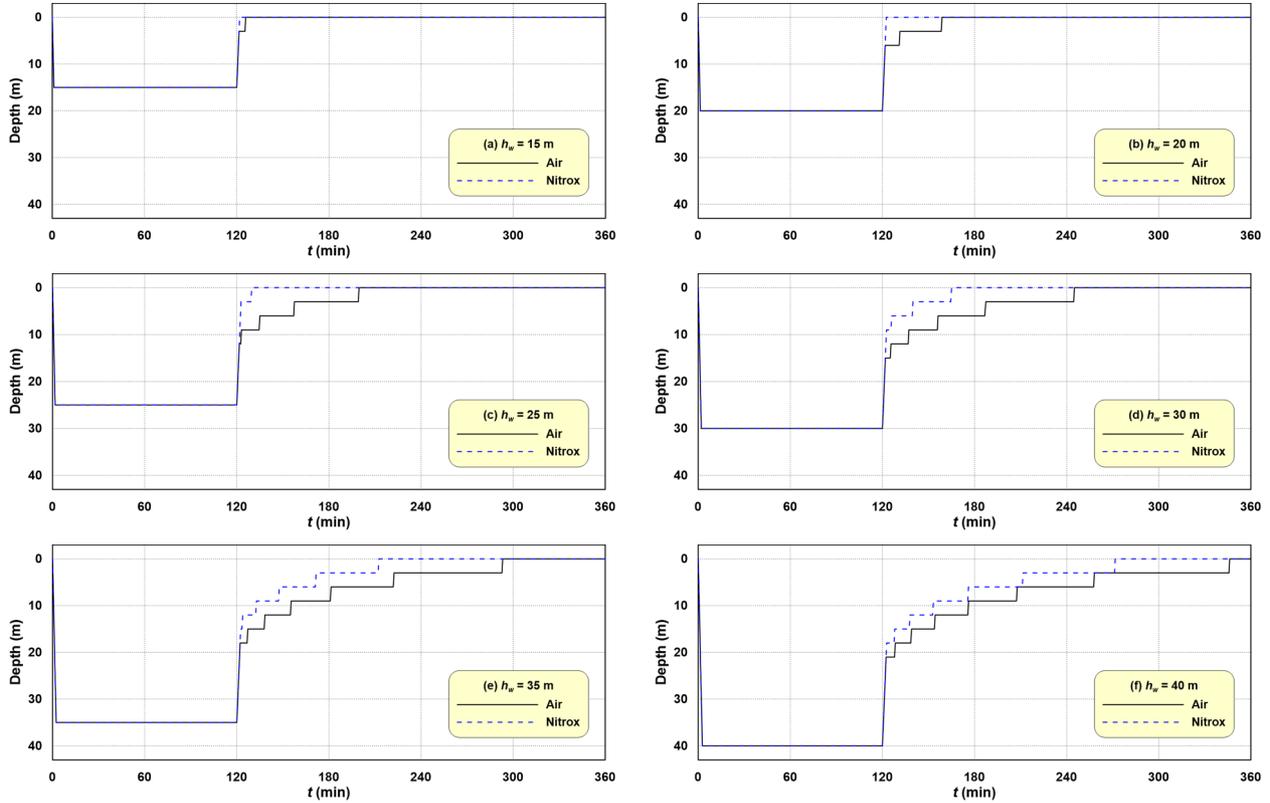


Fig. 4. Comparisons of diving time profiles between air and Nitrox diving.

드는 속도도 느리다. 그 때문에 나이트록스 잠수는 공기잠수보다 더 깊은 수심에서 무감압 잠수작업이 가능하다. EAD를 살펴보면, 나이트록스 잠수는 h_w 보다 더 낮은 수심에서 공기잠수를 수행한 것과 같은 효과를 볼 수 있다.

3.3.2 감압절차

Fig. 4는 공기잠수에서 감압이 필요한 작업수심 $h_w \geq 15$ m 조건에 대한 잠수·감압절차를 각각 나타낸 것이다.

Fig. 4로부터 h_w 가 클수록 퇴수시간이 늦어지는 것을 알 수 있다. 그 이유는 h_w 가 클수록 $T_w=120$ min 동안 체내로 녹아드는 질소량이 증가하기 때문이다. 이에 적절한 감압절차가 요구된다. 만약, 감압절차를 지키지 않으면, 다이버의 감압병 발병 위험성이 크게 높아진다. 이것을 극복하기 위해 개발된 나이트록스 잠수는 공기잠수에 비해 퇴수시간이 상당히 빠르다. h_w 가 클수록 공기잠수와 나이트록스 잠수의 감압시간 차(ΔT_{deco})가 증가하다가, $h_w=40$ m 조건에서 감소한다. 왜냐하면, h_w 가 클수록 PO_2 도 증가함으로 산소중독 위험성을 낮추기 위해 공기와 나이트록스의 ΔFO_2 도 작아질 수밖에 없다. 그럼에도 불구하고, $h_w=40$ m, $\Delta FO_2=0.06$ 조건에서 감압시간(T_{deco})이 크게 줄어든다.

h_w 에 따른 나이트록스 잠수의 T_{deco} 감소효과를 정량적으로 비교하기 위해 Table 7에 감압시간(T_{deco}) 감압시간 차(ΔT_{deco}), 감소율(R_d)을 각각 나타낸다. 여기서 T_{deco} 는 상승시간이 포함되어 있기 때문에 무감압 나이트록스 잠수인 $h_w \leq 20$ m 조건은 논의하지 않는다.

Table 7에서 공기잠수는 $h_w \geq 30$ m에서 T_{deco} 가 T_w 보다 크다. 나이트록스 잠수는 $h_w=40$ m에서만 $T_{deco} > T_w$ 이다. 이상의 h_w 에서는 다이버가 안전하게 물 밖으로 나오기 위해서는 작업시간보다 더 긴 감압시간을 가져야 한다. 모든 나이트록스 잠수의 T_{deco} 는 공기잠수에 비해 1시간 이상 짧고, $h_w=30$ m과 $h_w=35$ m에서는 1시

Table 7. Decompression times due to breathing gas conditions

h_w [m]	Decompression time, T_{deco}			Decreasing rate, R_d [%]
	Air	Nitrox	ΔT_{deco}	
-15	00:05:51	00:01:52	00:03:59	-
-20	00:38:49	00:02:30	00:36:19	-
-25	01:19:39	00:09:42	01:09:57	86.63
-30	02:05:03	00:45:00	01:20:03	63.97
-35	02:53:12	01:32:34	01:20:38	46.19
-40	03:46:13	02:31:39	01:14:34	32.71
Averaged value				57.38

unit: HH:MM:SS

간 20분 이상이나 짧다. R_d 는 $h_w=30$ m에서 86.63%로 가장 감압시간 감소효과가 좋다. 그리고 h_w 가 증가할수록 R_d 가 작아지는 것은 전술처럼 산소중독에 있어서 다이버 안전을 확보하기 위해 ΔF_{O_2} 가 작아지기 때문이다. 그 영향으로 h_w 증가에 따른 나이트록스 잠수의 T_{deco} 감소효과가 둔화된다. 그럼에도 $h_w \geq 25$ m에서는 나이트록스 잠수의 평균 R_d 는 57.38%로 T_{deco} 의 감소효과가 매우 우수하다.

3.3.3 고찰

잠수모의 결과에 근거하여 최적 나이트록스를 이용하여 잠수작업을 수행한다면, 15 m보다 낮은 작업수심에서는 공기잠수와 차이점을 찾아볼 수 없다. 그러나 연속적인 잠수작업을 수행할 경우에는 재잠수부터 나이트록스 잠수의 감압시간 감소효과가 나타날 것이다¹⁴⁾. 1시간 이상의 감압시간을 줄일 수 있었던 작업수심 25 m 이상에서는 상당히 효과적이다. 또한, 나이트록스는 질소비가 낮아 깊은 수심에서 공기잠수보다 질소마취에 걸릴 확률 낮아지는 장점도 가지고 있다.

한편, 작업수심 56 m을 초과하는 대수심에서는 공기잠수 역시 산소 부분압 허용한계 1.4를 넘어가기 때문에 산소중독에 있어서 다이버 안전을 담보할 수 없다. 이와 같은 잠수작업조건에서는 산소와 헬륨을 혼합한 헬리옥스(Heliox), 산소, 헬륨, 질소 3가지를 혼합한 트라이믹스(Trimix)를 고려해 볼 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 안전한 잠수작업을 위한 최적의 나이트록스 잠수에 대해 논의하기 위해 VPM¹²⁾을 이용한 잠수모의를 진행하였다. 공기잠수와 나이트록스 잠수를 비교·분석하여 얻은 주요사항은 다음과 같다.

- 1) VPM을 이용하여 공기/나이트록스 잠수모의를 진행하였으며, 작업수심이 깊을수록, 감압/잠수시간이 크게 증가하였다.
- 2) 작업시간 120분, 작업수심 15 m 이상에서 나이트록스 잠수는 공기잠수보다 잠수/감압시간을 크게 줄일 수 있었다.
- 3) 120분 잠수작업에서 공기잠수는 작업수심 30 m 이상에서 감압시간이 작업시간보다 길어졌다. 나이트록스 잠수는 작업수심 40 m에서만 전술의 결과가 나타났다.
- 4) 작업수심 25 m 이상에서 최적 나이트록스 잠수는 공기잠수에 비해 1시간 이상의 감압시간을 줄일 수 있었다.

- 5) 작업수심 25 m에서 공기잠수의 감압시간은 1시간 19분 39초이고, 나이트록스(EAN46)는 9분 42초로 86.63%의 감압시간 감소효과를 나타내었다.
- 6) 작업수심 35 m에서 공기잠수와 나이트록스(EAN30) 잠수의 감압시간은 2시간 53분 12초, 1시간 32분 34초이고, 그 차이는 1시간 20분 38초로 가장 크다.

이상의 결론을 종합하면, 나이트록스를 잠수작업 현장에 도입할 경우, 감압/잠수시간을 크게 줄일 수 있을 뿐 아니라, 다이버의 안전을 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다. 향후, 해양물리환경²⁸⁻³⁰⁾과 수중작업환경³¹⁻³⁵⁾을 직접 예측할 수 있는 유체역학적 수치모델^{36,37)}과 감압모델¹²⁾을 결합하여 다양한 수중환경이 감압절차에 미치는 영향을 분석한다.

감사의 글: 이 성과는 2018년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. NRF-2018R1C1B6007461).

References

- 1) KOSHA (Korea Occupational Safety & Health Agency), "Diving Work Safety Guidelines", KOSHA Guide, B-4-2011, p. 30, 2011.
- 2) H. D. Kim, "The Origin of Lethal Accident by SCUBA Diving", Underwater Science & Technology, Vol. 14-15, pp. 51-59, 2015.
- 3) C. H. Jung, C. W. Lee, J. M. Kim and S. Y. Kang, "A Study on the Characteristics of Diving Accident Based on the Reports of Diving Casualties", Journal of Navigation and Port Research, Vol. 30, No. 1, pp. 29-34, 2006.
- 4) IMCA, "International Code of Practice for Offshore Diving", International Marine Contractors Association, IMCA D 014, Revision 2, p. 79, 2014.
- 5) ADCI (Association of Diving Contractors International), "International Consensus Standards for Commercial Diving and Underwater Operations", Association of Diving Contractors International, 6.2 Edition, p. 352, 2016.
- 6) J. T. Joiner, "Commercial Diver Training Manual", Best Publishing, p. 362, 2007.
- 7) HSE (Health and Safety Executive), "Commercial Diving Projects Offshore", Diving at Work Regulations 1997, Approved Code of Practice and guidance (ACOP), L103, 1998.
- 8) 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.
- 9) H. Park, "A Study on the Safe Work for Industrial Diver Engaged in Port Construction Work", Master's Thesis, Pukyong National University, Korea, p. 59, 2016.
 - 10) 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.
 - 11) 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.
 - 12) 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", J. Korean Soc. Saf., Vol. 26, No. 2, pp. 42-47, 2011.
 - 13) 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.
 - 14) 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, pp. 206-210, 2019.
 - 15) W. D. Lee, S. G. Kim, M. H. Kim and J. H. Lee, "Air Diving Operation, Management and Planning for Safe and Effective Underwater Works", J. Korean Soc. Saf., Vol. 34, No. 4, pp. 103-110, 2019.
 - 16) C. Edmonds, B. McKenzie and R. Thomas, "Diving Medicine for Scuba Divers", JL Publications, p. 316, 1992.
 - 17) A. Chawla and AK. Lavania, "Oxygen Toxicity", Medical Journal Armed Forces India, Vol. 57, No. 2, pp. 131-3, 2001.
 - 18) N. Bitterman, "CNS Oxygen Toxicity", Undersea and Hyperbaric Medicine, UHM, Vol. 31, No. 1, pp. 63-72, 2004.
 - 19) 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", J. Korean Soc. Saf., Vol. 26, No. 2, pp. 42-47, 2011.
 - 20) 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, p. 875, 2013.
 - 21) 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.
 - 22) 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.
 - 23) 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.
 - 24) 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.
 - 25) E. C. Baker, "VPM-B Program Update Explanation", Available at ftp.decompression.org, 2002.
 - 26) E. C. Baker, "VPM-B Fortran Source Code", Available at ftp.decompression.org, 2003.
 - 27) A. A. Buhlmann, "Decompression-Decompression Sickness", Berlin New York: Springer-Verlag, 87p, 1984.
 - 28) 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.
 - 29) 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.
 - 30) 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", J. Korean Soc. Saf., Vol. 28, No. 5, pp. 54-60, 2013.
 - 31) 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.
 - 32) 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.
 - 33) J. Lee, J. Yoon and T. Ha, "Calculation of Nonlinear Energy Transfer in 3rd Generation Wave Models", Journal of Ocean Engineering and Technology, Vol. 31, No. 6, pp. 405-412, 2017.
 - 34) W. D. Lee, Y. M. Jeong, K. N. Choi and D. S. Hur, "Water

- Wave Propagation Caused by Underwater Blasting in a 3D Numerical Wave Tank”, Journal of the Korean Society of Civil Engineers. Vol. 33, No. 4, pp. 364-376, 2019.
- 35) 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.
- 36) W. D. Lee and D. S. Hur, “Development of 3-D Hydrodynamical Model for Understanding Numerical Analysis of Density Current due to Salinity and Temperature and its Verification”, Journal of the Korean Society of Civil Engineers. Vol. 34, No. 3, pp. 859-871, 2014.
- 37) W. D. Lee and D. S. Hur, “Development of a 3-D Coupled Hydro-Morphodynamic Model between Numerical Wave Tank and Morphodynamic Model under Wave-Current Interaction”, Journal of the Korean Society of Civil Engineers. Vol. 34, No. 5, pp. 1463-1476, 2014.