

# 거가대교 침매터널 잠수작업에서의 나이트록스 사용 사례 분석

우대희\* · 강신영\*\*† · 이민구\*\*

\*, \*\* 한국해양대학교 해양과학기술전문대학원 해양관리기술학과

## A Case Study of Nitrox Usage in Diving Operation of the Busan-Geoje Fixed Link Immersed Tunnel

Dae-Hee Woo\* · Sin-Young Kang\*\*† · Min-Gu Lee\*\*

\*, \*\* Department of Maritime Management Technology, Ocean Science and Technology School, Korea Maritime and Ocean University, Busan 49112, Korea

**요 약 :** 본 연구는 나이트록스 잠수와 공기 잠수를 비교하여 잠수작업에서의 안전성 및 경제성 평가를 시도하였다. 연구를 위해서 2010년 거가대교 침매터널 건설시 사용되었던 실제 잠수자료를 사용하였으며, 감압병 발생율, 작업시간, 감압시간 등 두 기체 다이빙의 특징을 분석하였다. 그 결과 잠수사가 호흡기체로 나이트록스를 사용하고 감압기체로 100% 산소를 사용한다면 감압병 발생확률을 최소화 할 수 있으며 감압기간 또한 크게 단축할 수 있음을 확인하였다. 그리고 실제 나이트록스를 사용한 공사기간과 공기 잠수를 하였을 경우의 가상의 공사기간을 비교해 본 결과 최대 3배의 공사기간 단축 효과를 가져왔음을 확인하였다. 결론적으로 시간적, 육체적으로 제한되어있는 환경에서 잠수 시 나이트록스 잠수가 공기 잠수보다 능률적이고 경제적임을 확인하였다.

**핵심용어 :** 산업잠수, 나이트록스 잠수, 거가대교, 침매터널, 잠수작업

**Abstract :** This study tried to evaluate the safety and economical benefit of Nitrox-diving by comparing with Air - diving. We used actual diving data which was recorded in construction site of the Busan-Geoje fixed link immersed tunnel in 2010. The study method was to assort and analyze the diving data by divers, depth, breathing air, and diving table. Furthermore, the study examined the possibility of outbreak decompression sickness by comparing Nitrox diving and Air diving in no-decompression limit time, decompression time, working time. As a result, this study confirms that if certain diver breathe Nitrox for diving and oxygen for decompression, not only the risk of decompression sickness could be minimized, but also duration of decompression could be shortened. Moreover, it was estimated that a remarkable difference(more than 3 times) between actual duration of underwater construction period and virtual construction period by using air. As a result, the study confirmed that Nitrox diving is more efficient and economical than Air diving in physically limited and hazardous diving environment.

**Key Words :** Commercial diving, Nitrox diving, GK Bridge, Immersed tunnel, Diving work

### 1. 서 론

산업 잠수 현장에서 잠수작업을 수행하는데 있어서 최우선 목표는 안전이며, 그 다음은 경제성이다. 일반적으로 산업 잠수에서는 잠수 헬멧(Diving helmet)과 엄빌리컬(Umbilical)

을 사용하는 표면공급식 잠수 시스템(Surface Supplied Diving System)이 기본으로 여겨지고 있는데, 대개 50m 이내의 수심에서는 공기를 호흡기체로 사용하고 그 이상의 수심에서는 헬륨과 산소를 혼합한 헬리옥스(Heliox)를 사용한다. 그러나 최근 감압의 효율성을 높이기 위해 산업 잠수에서 나이트록스(Nitrox)를 사용하기 시작하였다.

산업 잠수에 나이트록스가 사용되기 시작한 것은 극히 최근의 일이다. 1970년대에 미국의 NOAA(National Oceanic and Atmospheric Administration)에 의해 먼저 과학 잠수에 나이트록스가 도입되었다. 그 후 레저 잠수에는 약 20년이라는 시

\* First Author : daehee.woo@gmail.com, 051-410-4855

† Corresponding Author : sykang@kmou.ac.kr, 051-410-4323

※ 학술대회 발표논문 : 거가대교 침매터널잠수작업에서의 나이트록스 사용 사례 분석, 2015년도 춘계학술대회, 부경대학교, 4월 23일, pp 58-60.

험 기간을 거쳐 정착이 되었으나, 산업 잠수에서는 최근에 서야 나이트록스 사용에 대한 규정이 제정되거나(IMCA, 2012) 추가되었다(ADCI, 2014). 이는 테크니컬 잠수의 활성화와 함께 나이트록스 사용에 대한 여러 가지 의문점들이 빠르게 해소되었고, 안전성에 대해서 어느 정도 확인이 되었기 때문이라 생각된다.

본 논문에서는 2010년 거가대교 침매터널 작업 현장에서 사용한 나이트록스 잠수 자료들을 분석해보고 산업 잠수 분야에서 공기 대신 나이트록스 사용으로 얻을 수 있는 효율성 향상 및 경제적 혜택을 계량적으로 산출하는 시도를 하였다. 그 과정에 나이트록스와 공기 잠수의 차이점이 잠수사의 감압병 발생 확률에 미치는 영향을 알아보고, 아울러 수중 산소감압의 긍정적 측면을 통합적으로 살펴보았다.

본 연구의 결과는 나이트록스 잠수와 관련하여 향후 산업 안전보건법을 비롯한 산업 잠수와 관련된 국내 법령 개정을 위한 기초 자료로써 사용되고, 또한 산업 잠수 현장에서 더욱 안전하고 경제적인 작업을 수행하는데 필요한 참고 자료로 활용될 수 있기를 기대한다.

## 2. 이론적 고찰

### 2.1 나이트록스 잠수의 개념

나이트록스란 질소와 산소의 혼합기체이다. 공기는 산소 21%와 질소 79%로 구성되고 있기 때문에 엄밀히 말해 공기도 나이트록스이다. 산소의 혼합비가 21% 이상인 나이트록스는 산소 강화 공기 또는 EANx(Enriched Air Nitrox)라 부르지만 보통은 줄여서 그냥 나이트록스라고 부른다. 본 논문에서도 나이트록스란 EANx를 의미한다.

잠수 중 체내에 흡수되는 질소의 양에 따라 잠수사의 감압의 유, 무가 결정되는데, 잠수사의 체내에 흡수되는 질소량은 호흡하는 기체 중의 질소 부분압에 의해 결정된다. 만약 우리가 호흡하는 기체 속의 질소를 감소시키고 산소를 추가하면, 산소는 신진대사에 의해 소모가 될 것이므로 우리는 체내 질소 흡수율을 줄일 수 있게 된다. 이 간단한 원칙이 감압 측면에서 이득의 기본이 되고 있다. 이것이 바로 잠수에 EANx를 사용하는 주된 이유이다.

그러나 이 변화는 다른 문제들을 야기할 수 있다. 즉, 공기 잠수 시 일어나는 모든 문제가 EANx 잠수 시에도 일어나는데, 여기에 추가적으로 잘못된 EANx의 혼합으로 감압병이나 산소중독과 같은 중대한 생리학적인 문제가 발생할 수 있으며, 고비용의 산소 사용으로 인한 장비의 화재 발생의 위험이 항상 존재하고 있다.

### 2.2 나이트록스 잠수의 특성

#### 1) 나이트록스 잠수의 장점

호흡하는 혼합기체의 질소의 양을 줄이면 산소의 양은 증가하고, 주어진 수심에서의 무감압한계 시간이 더 길어지는 반면 감압시간은 짧아진다. 나이트록스 잠수를 할 경우, 체내에 남아있는 잔류 질소량은 공기보다 적어진다. 따라서 반복 잠수 시 수면휴식시간이 단축되고 잠수 시간이 연장된다.

#### 2) 산소 독성

높은 부분압의 산소는 잠복기(Latent Period)보다 짧은 시간을 흡입하면 인체에 아무런 영향이 나타나지 않지만, 오랫동안 흡입할 경우 산소 독성이 나타난다. 높은 부분압의 산소는 거의 모든 조직에 영향을 미칠 수 있으며 산소 독성의 양상은 다양하다. Lorraine Smith 효과로 알려진 폐 산소 독성(Pulmonary Toxicity)과 Paul Bert 효과로 알려진 중추신경계 산소 독성(CNS Toxicity)이 가장 대표적이다. 이러한 산소 독성은 흡입 산소의 부분압이 증가하거나 노출 시간이 연장되면 심해지며, 개인차 또한 크다(Edmonds et al., 1992).

나이트록스 잠수에서의 가장 큰 생리학적인 위험 요인은 바로 중추신경계 산소 독성이다. 앞에서 나이트록스 사용으로 무감압한계 시간의 연장이 가능하다고 하였는데, 역으로 높은 산소 부분압으로 인한 산소 독성의 위험 때문에 잠수 시간의 제약을 받을 수 있다.

#### 3) 최적기체와 산소 부분압

나이트록스 기체를 사용하는 잠수에서 작업시간을 최대한으로 연장할 수 있는 산소비율로 혼합한 기체를 최적기체(Best Mix)라고 한다. 산소 부분압(ppO<sub>2</sub>)의 허용한계는 잠수단계에 따라 조금씩 규정이 다르지만, 일반적으로 작업시간, 잠수의 종류 및 목적에 따라 1.2-1.8기압의 범위로 결정된다. 본 논문에서는 산소 부분압의 허용한계를 약간 보수적인 값으로 여겨지고 있는 1.4기압으로 하였다.

#### 4) 최대운용수심 및 공기환산수심

나이트록스 잠수에서 MOD(Maximum Operating Depth)는 잠수 가능한 최대운용수심이며, 산소 부분압의 허용한계에 의해 결정된다. 특히 호흡기체로 나이트록스나 트라이믹스(Trimix)를 사용하는 잠수에서 잠수사의 산소 독성을 최소화하기 위한 잠수 계획 수립 시 반드시 고려되어야 할 사항이다.

MOD는 다음의 식으로 구할 수 있다.

$$MOD(m) = 10m \times \left[ \left( \frac{ppO_2}{FO_2} \right) - 1 \right] \quad (1)$$

ppO<sub>2</sub> = 산소의 부분압

FO<sub>2</sub> = 산소의 비율

그리고 나이트록스를 사용할 때의 감압 절차는 공기환산 수심(EAD: Equivalent Air Depth)의 개념에 근거하고 있다. 이 절차의 기본 개념은 특정 수심에서 나이트록스를 사용할 때의 질소압력이 공기를 사용할 때의 질소압력과 같게 되는 수심을 구해서 그 수심에서의 감압절차를 따른다는 것이다. EAD는 다음 식으로 구할 수 있다.

$$EAD(msw) = (FN_2)(D+10)/0.79 - 10 \quad (2)$$

$FN_2$  = 질소의 비율(소수점표기)

$D$  = 수심(msw)

### 2.3 수중 산소 감압

수중에서 산소를 이용한 감압을 시행할 때 산소 독성의 위험성이 있으므로 100% 산소를 공급하는 최대 수심은 6m로 제한해야 한다. 산소 흡입 중에는 항상 2인 1조로 수중에 머물며 각자 서로의 대기 잠수사(stand-by diver) 임무를 수행해야 하며, 갑작스러운 발작에 대비할 수 있어야 한다. 만일 1명의 잠수사만 산소 감압이 필요하다더라도 반드시 대기 잠수사가 주변에 있어야 한다.

## 3. 침매터널 잠수 자료 분류 및 분석

### 3.1 거가대교 침매터널 잠수 자료

거가대교 침매터널 현장에서의 잠수작업은 잠수 전용 바지선에서 실시되었다. 잠수 전용 바지선은 길이 약 80m, 폭 30m, 총톤수 995ton으로 잠수 관련 장비와 함체 침설 후 부속 기계류를 인양하기 위한 작업 공간을 보유하고 있다. 작업 조건과 해상상태에 따라 2점 묘박 또는 4점 묘박을 선택할 수 있으며, 바지선에 설치된 GPS(Global Positioning System)를 이용해 선체의 정확한 위치를 확인하여 작업을 수행할 수 있다. 바지선에는 중앙에 150ton 크레인이 있으며, 양옆으로 잠수 조정실과 나이트록스 시스템, 잠수 챔버 컨테이너가 설치되었다. 그리고 웨벨(Wet bell)과 LARS(Launch and Recovery System)가 그 옆에 설치되었고 반대편으로는 발전기와 잠수 장비 컨테이너, 사무실 등이 설치되었다.

#### 1) 잠수사 현황

침매터널 잠수작업에는 약 30명의 잠수사가 참가하였고 국적별로 대한민국, 영국, 독일, 네덜란드, 인도 국적으로 나이는 28~35세 사이로 최소 5-20년의 잠수 경력이 있는 잠수사로 구성되었다. 잠수팀은 대한민국, 네덜란드, 인도 출신의 잠수감독관 하에 3개 팀으로 구분하였다.

### 2) 수심별 사용 잠수기체 분류

침매터널 잠수작업은 가덕도의 1번 함체부터 중죽도의 18번 함체까지 총 18개의 함체를 연결해 해저터널을 만드는 작업이다. 1번 함체에서 9번 함체까지 약 1.6km의 구간의 수심은 약 8-33m까지 완만한 경사로 깊어진다. 10번 함체에서 수심은 급격히 깊어지고 13번 함체에서 최대 50m의 작업 수심에 이른다. 그 후로 마지막 18번 함체까지 수심이 서서히 높아져 육상의 연결부로 이어진다.

Fig. 1은 각 함체별 작업 수심이다. 침매터널 잠수작업의 평균수심은 25.7m이다. 전체 잠수작업의 85%에 해당하는 562회의 잠수가 11-40m 사이의 수심에서 시행되었다.

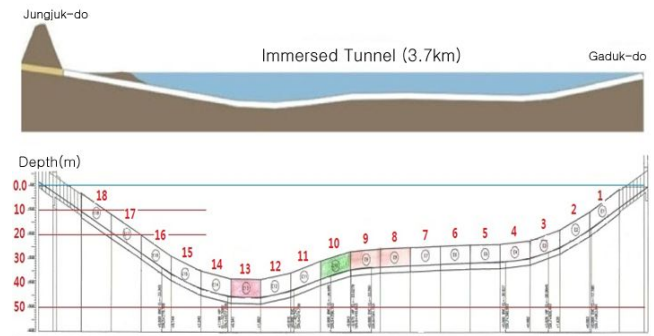


Fig. 1. Diving depth in Busan-Geoje Fixed Link project.

침매터널 현장의 잠수작업에서는 잠수사의 주 호흡기체로 나이트록스와 공기가 사용되었다. 전체 잠수작업 중 나이트록스가 사용된 잠수작업은 441회였으며, 전체 작업시간은 29,063분이다. 공기 잠수는 총 210회 시행되었으며, 수중 작업시간은 10,343분이다. 공기 잠수의 경우 수심이 깊어질수록 사용횟수가 점차 감소하였다. 전체 작업의 나이트록스 사용 비율은 67.7%이며, 사용시간은 73.7%이다. Table 1에 나이트록스와 공기의 수심별 잠수작업 통계가 나와 있다.

Table 1. Depth distribution of Nitrox & Air diving

Depth(m)	Nitrox diving		Air diving	
	Number	Tme(min)	Number	Time(min)
0-10	23	1,687	27	1,447
11-20	94	6,680	92	4,713
21-30	150	9,594	45	2,346
31-40	144	9,476	37	1,603
41-50	30	1,626	9	234
Total	441	29,063	210	10,343

## 거가대교 침매터널 잠수작업에서의 나이트록스 사용 사례 분석

표에서 수심 20 m 이하에서 나이트록스 잠수작업이 크게 증가한 것을 확인할 수 있다. 그리고 질소마취가 시작되는 30 m 이하의 잠수작업에서 나이트록스의 사용량이 공기보다 약 3.7배 정도 많았으며, 작업시간은 공기보다 약 6배 정도 많다.

### 3) 사용된 잠수기체의 종류

침매터널 잠수작업에서는 작업 수심에 따라 공기와 EAN26, EAN30, EAN32, EAN34, EAN36, EAN38, EAN40의 나이트록스가 사용되었다. 공기의 경우 평균 작업 수심은 20.5 m이고 평균 잠수시간은 59분이었다. 그리고 나이트록스는 기체별, 수심대별로 다양하게 사용되었는데, 전체 나이트록스 잠수의 평균 작업 수심은 27.3 m이다. 가장 깊은 수심에서 사용한 나이트록스는 EAN26으로 이 기체가 사용된 작업의 평균 수심은 42.2 m이다.

### 4) 감압기체의 분류

침매터널 잠수작업에서는 전체 651회의 잠수작업 중 무감압 잠수 196회를 제외한 455회의 잠수작업에서 감압이 시행되었다. 감압기체로는 공기, 나이트록스, 100% 산소가 사용되었다(Table 2).

Table 2. Classification of decompression type

Decompression	Number of decompression	Percentage	Average depth(m)
No-decompression	196	30.1%	15.0
Air	131	20.1%	23.7
Nitrox	223	34.3%	29.4
Nitrox & Oxygen	99	15.2%	36.9
100% Oxygen	2	0.3%	35.0
Total	651	100%	-

### 5) 사용한 다이브 테이블

침매터널 잠수작업에서는 작업 수심과 사용한 기체, 감압의 종류에 따라 V-planner 산업 잠수용 테이블(Hhssoftware, 2015), 네덜란드의 Standard Air-Tabellen(NSIL-88) 테이블 및 Nitrox 40/60-Tabellen(NSNI 88) 테이블(NDC, 1988), 캐나다의 DCIEM 다이브 테이블(DCIEM, 1992) 그리고 미국의 USN 다이브 테이블(USN, 2008)이 사용되었다.

### 6) 표면공급식 잠수와 웨트벨을 사용한 잠수의 작업투입

대부분의 잠수에서는 표면공급식 잠수장비와 웨트벨이 사용되었는데, 표면공급식 잠수장비가 364회, 웨트벨은 287회 사용되었다. 웨트벨은 상부 공간에 에어포켓이 있어 잠수사가

머리와 상체를 수중에 노출하지 않은 상태를 유지할 수 있으므로 감압에 좀 더 효율적이며, 잠수사의 안전성도 향상할 수 있다. 또한, 웨트벨에는 기본적으로 비상기체 실린더가 설치되어 있어 비상상황 발생 시 요긴하게 사용할 수 있다 (Table 3).

Table 3. Work time comparison of SSDS & wet bell systems

Category	SSDS	Wet bell
Number of diving	364	287
Usage ratio(%)	55.9	44.1
Average depth(m)	19.5	32.2

침매터널은 유속이 강한 외해에 건설되어 잠수사가 받는 유속 저항이 크다. 웨트벨을 사용함으로써 잠수사의 하강 또는 상승 시 유속의 영향을 덜 받아 잠수사의 피로를 덜어주고 수중 감압 시 잠수사가 위험 환경에 노출되는 상태와 노출 시간을 줄여줄 수 있었다. 규정에 의하면 표면공급식 잠수의 경우 수중에서 1.0 knot, 해저 면에서 1.2 knot까지 잠수작업이 허용된다. 그리고 웨트벨을 사용하면 수중에서 1.5 knot, 해저 면에서 1.8 knot로 허용범위가 증가된다(IMCA,1987).

## 3.2 나이트록스와 공기의 안전성 비교

### 1) 나이트록스와 공기의 감압병 발생률

침매터널에서 발생한 감압병 발생률을 분석하기 위해 공기 잠수에서의 감압병 발생에 대한 선행 연구들과 비교해 보았다.

Table 4는 침매터널 잠수작업에서 발생한 감압병 통계이다. 전체 651회의 잠수작업 중 공기를 사용한 잠수에서 2건의 감압병이 발생하였으며, 이를 비율로 환산하면 발생률은 0.307%이다. 침매터널의 공기 잠수에서 감압병 발생률은 비교적도 Shields(1987)의 감압병 발생률인 0.307%와 같게 나왔다. 나이트록스와 100% 산소를 사용한 잠수작업은 수심 30 m 이하의 잠수가 대부분이었는데, 감압병이 1건도 발생하지 않았다.

Table 4. DCS records of Busan-Geoje Fixed Link project

Category	Diving of Busan-Geoje Fixed Link project	
	Air	Nitrox
Gas		
Number of diving	210	441
Number of DCS	2	0
Percentage of DCS	0.307 %	0.0 %

**2) 나이트록스와 수중 산소 감압의 효과**

일반적으로 산업 잠수에서는 감압의 한 형태로 Sur-D-O2를 많이 사용한다. 이는 북해에서 시행되는 잠수작업의 표준절차로 잠수사가 잠수를 마치면 수면으로 바로 상승하고, 갑판 위의 챔버에 바로 들어가서 12m로 재압을 하는 방식이다. 해상상태가 나쁘고 추운 지역에서 이 방법을 사용하면 잠수사의 안전을 확보할 수 있으며, 수중에서 감압하는 것보다 편안하게 감압을 수행할 수 있는 장점이 있다.

하지만 300,000회의 잠수를 분석한 Imbert(2006)의 연구결과에 의하면 Sur-D-O2 방식은 수중 감압보다 10배나 많은 감압병을 발생시키는 경향을 보이고 있다. 그래서 침매터널 잠수작업에서는 수중 감압 방식이 채택되었고, 나이트록스와 함께 100% 산소가 감압기체로 사용되었다. 그리고 침매터널에서 산소 감압을 시행한 대부분 잠수작업이 Shields(1987)의 연구 결과에서 감압병 발생분포가 높은 수심 30-40m, 60분 전후의 해저체류시간 범위에 포함되지만 감압병은 발생되지 않았다.

**3.3 나이트록스와 공기의 효율성 비교**

**1) 최적기체와 공기의 무감압 한계 비교**

동일 수심의 잠수작업에서 작업시간이 긴 기체의 효율성이 더 높다고 할 수 있다. 이 작업시간은 각 기체의 무감압 한계(NDL: No Decompression Limit)를 비교하는 방법으로 확인할 수 있다.

공기와 나이트록스(최적기체)의 NDL은 DCIEM 다이브 테이블을 참고하였다. 그리고 공기 잠수와 같은 수심에서 나이트록스의 NDL을 구하기 위해 나이트록스의 최적기체를 구하였고, 계산된 최적기체를 이용해 같은 수심에서의 EAD를 계산하였다. 공기 잠수 테이블에서 생성된 EAD의 NDL은 나이트록스의 NDL이 된다. 최적기체를 구하기 위하여 사용한 산소 부분압은 1.4기압이다.

나이트록스를 사용하여 수심 15m 이내에서 잠수작업을 하면 감압 없이 최대 12시간까지 머물 수 있다. 같은 수심에서 공기 잠수로 작업한 경우 작업시간은 75분이다. 그리고 18m 수심에서는 공기 잠수로 최대 50분간 작업이 가능하며, 나이트록스의 경우 최적기체의 EAD를 환산해 보면 공기로 9m에서 작업하는 것과 같은 효과가 있으므로 최대 300분간의 작업이 가능하다. 잠수사가 나이트록스를 사용하는 것만으로 6배의 작업시간이 연장된다. 나이트록스의 NDL은 6-720분까지이며, 공기의 NDL은 0-150분까지이다.

**2) 나이트록스와 공기의 작업시간 비교**

실제 잠수작업에 사용한 나이트록스의 효율성을 평가하기 위해 동일한 작업조건으로 공기 잠수를 하였을 경우를

가정하여 두 기체간의 총 작업시간을 비교하였다(Table 5). 나이트록스 잠수 평균 작업 수심은 27m이며, 평균 작업시간은 66분이다. 그리고 감압을 포함한 총 작업시간은 35,022분이다.

Table 5. Comparison of nitrox & air diving data

Category	Nitrox diving	Air diving
Number of diving	441	441
Average diving time	66(min)	66(min)
Average diving depth	27.0m	27.0m
Total diving time	35,022(min)	59,535(min)

만일 이 작업을 위해 나이트록스 대신 공기를 사용한다고 가정하면(27.0m에서 66분간) 감압을 포함한 총 작업시간은 59,535분으로 증가하게 된다. 즉, 공기를 사용할 경우 나이트록스를 사용하여 작업했을 때보다 작업시간이 약 170% 정도 늘어나게 된다. 본 연구에서는 이 작업시간의 이득을 작업지연상수( $\Delta WT$ )로 명명하였고 그 값은 약 1.7이 된다.

그리고 공기와 나이트록스 잠수의 실제 수심과 EAD를 비교해보면 수심 20m에서 EAN50을 사용하였을 경우 EAD가 약 10m로 나이트록스를 사용함으로써 약 10m 낮은 수심에서 잠수하는 효과를 얻을 수 있다. 20m 수심에서 EAN32, EAN36, EAN40을 사용해도 유사한 결과를 얻을 수 있다. 같은 수심에서 사용기체에 따른 실제 수심과 EAD의 차이는 해저체류시간에 직접적인 영향을 미친다. 실제 수심과 EAD의 차이는 나이트록스의 종류에 따라 다른데 같은 수심에서 공기대비 약 1.2-2.2배 범위이다.

**3) 나이트록스와 공기의 감압시간 비교**

나이트록스와 공기 잠수작업의 효율성 비교를 위해서는 작업 후 실제 감압시간을 비교하였다. 잠수작업의 특성상 수중에서의 작업시간이 길어질수록 그에 따른 감압시간도 비례해서 늘어난다. 만일 나이트록스와 공기를 사용해 같은 수심에서 같은 작업을 시행할 때 논리적으로 두 기체 중 감압시간이 짧은 기체가 더 효율적이라고 할 수 있다.

침매터널 잠수작업에서 감압 잠수는 총 455회가 실시되었고 그중 나이트록스 잠수는 324회, 공기 잠수는 131회이다. 나이트록스와 공기 잠수의 평균 작업시간은 각각 67.1분과 56.3분이며 평균 감압시간은 18.4분과 12.1분이었다.

공기 대신 나이트록스를 사용해서 얻을 수 있는 감압시간 감소 효과를 계량하기 위해 본 연구에서는 감압시간의 차이를 비율로 표시하고 이를 감압상수( $\Delta DT$ )라 명명하였다. 이 값을 구하기 위해서 평균 감압시간을 사용할 경우  $\Delta DT$  값

## 거가대교 침매터널 잠수작업에서의 나이트록스 사용 사례 분석

은 1.52가 되지만 이 값은 수심별 효과를 전혀 반영하지 못한다. 그래서 본 연구에서는 공사 현장의 평균 수심 25.7m 부근이면서 비교적 자료가 많은 24m를 대표로 선택하였다. Table 6에 수심 24m에서의 감압 자료가 나와 있는데, 평균 작업시간은 나이트록스가 약 27분 정도 더 길고 평균 감압 시간은 약 4분 정도 짧아진다. 공통적으로 다른 수심대에서도 공기 대신 나이트록스를 사용하면 작업시간은 길어지고 감압시간은 짧아진다. 그런데 이 수심에서의 정확한  $\Delta DT$  값은 1.37이지만 반올림하여 1.4를 침매터널 잠수작업의 평균 감압상수로 정하였다.

Table 6. Comparison of decompression data at 24 m

Category	Nitrox diving	Air diving
Number of decompression	20	10
Average diving time(min)	68.3	41.2
Average decompression time(min)	11.2	15.2

### 3.4 나이트록스의 경제성 비교

#### 1) 공사기간의 단축

침매터널 공사기간의 경제성을 검토하기 위해서 나이트록스를 사용한 실제 공사기간과 공기만을 사용한 가상의 공사기간을 비교하여 얼마만큼의 차이가 나는지 비교해보았다. 같은 조건에서 공사기간이 짧을수록 경제적으로 더 이득이라고 할 수 있다.

거가대교 침매터널의 잠수작업은 약 30개월이 소요되었는데 나이트록스와 공기 잠수로 이루어진 30개월의 실제 공사기간을 공기만을 사용한 잠수작업으로 바꾸기 위해서 식(3)을 도입하였다.

$$T_a = T_n \times \Delta WT \times \Delta DT \quad (3)$$

$T_a$  = 공기잠수의 예상 작업기간

$T_n$  = 실제 나이트록스 작업기간

$\Delta WT$  = 작업 지연 상수

$\Delta DT$  = 감압 상수

Fig. 2는 실제 공사기간과 식(1)에 의해 산출된 가상의 공기 잠수 공사기간을 나타낸다. 수평축은 나이트록스 잠수의 실제 공사기간과 작업지연상수( $\Delta WT$ ) 1.2, 1.7, 2.2를 적용한 가상의 공기 잠수 공사기간이다. 계산 결과에 의하면 공기 잠수의 공사기간은 최대 92개월로 나이트록스 잠수의 30개월과 비교해 작업기간이 약 3배 이상 길어지는 것을 알 수 있다.

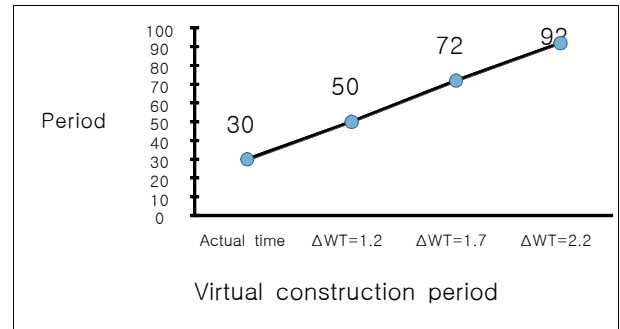


Fig. 2. Virtual construction period of air diving.

### 2) 공사비용의 절감

현재 국내 산업 잠수업계는 작업의 종류 및 기간에 따라 잠수작업 단가의 기준이 다르고 정부에서 발간하는 표준품 샘플의 잠수사 단가도 현실과는 맞지 않다. 세월호 잠수 현장의 민간 잠수사의 단가는 국제구난협회(ISU: International Salvage Union) 기준단가와 전문가의 의견을 거쳐 1일 비용이 98만 원으로 책정된 사례가 있다(Korea JoongAng Daily, 2014). 본 논문에서는 잠수사의 적정 단가를 적용하기 위해 국제적으로 통용되는 영국 Lloyd의 SCOPIC(Special Compensation P&I Clubs) tariff(Lloyds, 2014)를 참조하여 1일 비용을 120만 원으로 책정하였다. 국제적으로 잠수감독관과 잠수사의 1일 비용은 대략 100-140만 원 선에서 책정된다.

Table 7. Cost comparison of air & nitrox diving

Category	period (month)	cost (won)
Nitrox diving	30	₩32,400,000,000
Air diving ( $\Delta WT=1.2$ )	50	₩54,432,000,000
Air diving ( $\Delta WT=1.7$ )	72	₩77,112,000,000
Air diving ( $\Delta WT=2.2$ )	92	₩99,792,000,000

## 4. 분석결과

### 4.1 나이트록스의 안전성 분석결과

거가대교 침매터널 구간은 50m에 이르는 깊은 바다 수심과 낙동강 하구의 연약지반, 가덕 수로의 빠른 조류 등의 열악한 환경과 3년간의 긴 공사기간 때문에 다른 작업 현장보다 잠수사에게 발생할 수 있는 감압병이나 잠수 관련 질병의 위험이 컸다. 그러나 전체 651회의 잠수작업 중 공기를 사용한 잠수에서만 2건의 감압병이 발생하였고, 특히 나이트록스 잠수 후 100% 산소로 감압한 경우는 대부분 30m 이하의 수심에서 시행되었는데도 불구하고 감압병이 1건도 발생하지 않았다.

물론 감압병이 발생하지 않은 근본적인 이유는 호흡기체 중의 질소 비율 감소이다. 또 다른 이유로 100% 산소를 이용한 수중 산소 감압의 효과도 있다. 이 결과는 나이트록스와 산소를 사용한 잠수작업이 공기를 사용하는 잠수작업보다 훨씬 안전하다는 것을 실질적으로 확인시켜주었다 할 수 있다.

그러나 본 논문에서는 언급을 하지 않았지만 나이트록스 잠수의 다른 하나의 큰 위험요인으로 장비 및 산소 취급 부주의로 인한 화재 및 폭발이 있다. 이 문제는 규정을 잘 준수하고 관리를 철저히 함으로써 어느 정도 예방될 수 있을 것이다.

#### 4.2 나이트록스의 효율성 분석 결과

Table 8은 나이트록스 사용으로 인한 효율성 변화를 요약한 결과이다. 평균수심에서 공기 대신 나이트록스를 사용하면 NDL은 25분에서 50분으로 약 100% 증가한다. 수중 작업 시간은 공기를 사용할 경우 나이트록스 대비 약 170% 증가하여 공사기간이 크게 지연됨을 확인하였다. 반면 감압시간은 약 135% 감소하였다.

Table 8. Work efficiency at average depth

Category	Nitrox	Air	Efficiency
NDL(min)	50	25	100% increase
Diving time(min)	35,022	59,535	170% increase
Decompression time(min)	11.2	15.2	135% decrease

위의 결과에서 핵심은 나이트록스를 사용하면 수중 작업 시간을 늘일 수 있어 공사기간을 단축시킬 수 있다는 것이다. 이는 바로 공사비용 절감이라는 큰 혜택과 직접적으로 연결된다.

#### 4.3 나이트록스의 경제성 분석 결과

공기로 잠수작업을 하였을 경우 공사기간은 최대 3배 늘어날 수 있으며 이를 공사비용으로 환산하면 640억 원이 더 필요하게 된다. 물론 나이트록스와 공기 잠수의 공사금액을 정확하게 비교하기 위해서는 앞에서 언급한 작업지연상수와 감압상수 외에도 나이트록스 잠수작업 시 발생하는 추가 장비들의 가격 및 운용 인력들이 고려되어야 한다. 그러나 나이트록스 잠수에 사용되는 대부분 장비들은 공기 잠수와 공통으로 사용할 수 있으므로 추가 장비 확보에 드는 경비는 전체 공사비와 비교하여 그리 큰 비중을 차지하지 않을 것으로 예상된다. 또 공사기간이 길수록 추가 장비로 인한 비용의 영향은 더욱 적어질 것이다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 거가대교 침매터널 잠수작업에서의 나이트록스 사용 사례를 분석해보았다. 나이트록스의 이론상 장점과 잠수현장에서 실제 사용하는 기체로서의 차이를 비교한 결과 국내의 산업 잠수 현장에도 효율적인 기체로 활용될 수 있음을 확인하였다. 본 연구의 결과는 수심분포 50m 이하, 평균 수심 25.7m인 경우에 국한된 것이며, 요약하면 다음과 같다.

첫째, 잠수사가 호흡기체와 감압기체로 나이트록스를 사용하면 감압병 발생 확률을 최소화할 수 있으며, 감압기간 또한 단축시킬 수 있다.

둘째, 동등한 수심에서 잠수작업 시 나이트록스 대신 공기를 사용할 경우 잠수시간은 평균적으로 170%로 늘어났다.

셋째, 나이트록스를 사용한 실제 공사기간과 공기 잠수의 가상 공사기간을 비교하여 본 결과 최대 3배 이상의 공사기간이 늘어나고 이를 비용으로 환산할 경우 640억 원 더 많아짐을 확인하였다.

현재까지 우리나라 산업 잠수업계는 공기 잠수에 국한되어 왔다. 본 연구는 국내 산업 잠수 수중공사 현장에서 국제 규정을 준수하며 나이트록스를 사용한 최초의 사례였다. 본 연구결과는 국내 산업 잠수업계에 나이트록스 사용을 활성화시킬 수 있는 계기가 될 수 있을 것으로 기대된다. 이 과정에서 향후 나이트록스를 사용한 잠수사들의 건강 상태 모니터링과 실증적인 안전성 및 경제성 분석을 포함하여 산업 잠수에서의 나이트록스 사용에 대한 지속적인 후속 연구가 시행되어야 할 것이다.

## References

- [1] ADCI(2014), Association of Diving Contractors International, International Consensus Standards for Commercial Diving and Underwater Operations, 6.1 Ed., pp. 52-55.
- [2] DCIEM(1992), Defense and Civil Institute of Environmental Medicine, DCIEM diving manual, Universal dive techtronics, Inc.: CANADA, pp. 7-8.
- [3] Edmonds, C., C. Lowry and J. Pennefather(1992), Oxygen Toxicity, Diving and Subaquatic Medicine, Oxford; Butterworth-Heinemann, pp. 241-256.
- [4] Hhssoftware(2015), V-planner Commercial Diver, Available at: <http://www.hhssoftware.com/v-planner-cde/> [Accessed 12 Feb 2015].
- [5] Imbert, J. P.(2006), Commercial Diving: 90msw Operational Aspects, In: Lang, MA and Smith, NE (eds), Proceeding of

Advanced Scientific Diving Workshop, Washington DC, February 23-24, 2006, Smithsonian Institution: Washington, p. 122.

- [6] IMCA(2012), International Marine Contractors Association, Surface Supplied Diving Operation using Nitrox, IMCA D 048, March 2012, p. 14.
- [7] IMCA(1987), International Marine Contractors Association, AODC 047 The Effects of Underwater Currents on Divers' Performance and Safety, pp. 4-5.
- [8] Korea JoongAng Daily(2014), News, [http://article.joins.com/news/article/article.asp?total\\_id=14987553&ctg=1200](http://article.joins.com/news/article/article.asp?total_id=14987553&ctg=1200).
- [9] Lloyds(2014), SCOPIC Clause Tariff Appendix A, London: Lloyds, Available at: <http://www.lloyds.com/Search?q=scopic> [Accessed 12 Feb 2015].
- [10] NDC(1988), Netherlands Diving Centrs, NDC Decompressie-tabellen, The Netherlands Training and Knowledge Centre Hyperbaric Labour, Available at:<http://www.nokwoo.nl/> [Accessed 12 Feb 2015].
- [11] Shields, T. G.(1987), Decompression Sickness in Commercial Air Divers, Proceeding of an International Conference (Subtech'87), Aberdeen, November 10-12, 1987, Society of Underwater Technology: UK, pp. 171-172.
- [12] USN(2008), US Navy Diving Manual, Revision 6, NAVSEA, SS521-AG-PRO-010, pp. 9.61-9.84.

---

Received : 2015. 09. 25.

Revised : 2015. 11. 05.

Accepted : 2015. 12. 28.