
잠수활동에서 혼합가스 호흡과 김입증(잠수병)의 고찰

류재창* 제주대학교

The relationship between Decompression Sickness(DCS) and Mixtures of Gases in Underwater Activities

Ryew, Che-Cheong *Jeju National University*

ABSTRACT

The aim of the study was to review the effects of mixtures breathing gases on the decompression sickness(DCS), which was divided into embolism, inert gas narcosis, and oxygen balance as decompression syndrome explained in previous studies in diving. Certainly most established diving practices try to avoid situations which one or another, or combinations, threaten a diver. To prevent those, mixed breathing gases, across a spectrum of activities, have been utilized successfully, which mostly consist of mixtures of nitrogen, helium, and oxygen, differing from pure air, and lately those with higher oxygen content than air(enriched), which can be employed efficiently in shallow diving. Non-enriched mixtures of nitrogen/oxygen(nitrox), helium/oxygen(heliox), and helium/nitrogen/oxygen(trimix), of course, have been employed commercially in deep and saturation diving. Recently, mixtures of hydrogen/oxygen(hydrox) have been tested. Furthermore, for precise examination of the mixture of more breathing gases' effects in underwater activities, it may be necessary to test the influence of mixtures breathing of quadrox(nitrogen/hydrogen/helium/oxygen) for effective activities.

논문정보

논문투고 : 2012. 2. 1.
논문수정 : 2012. 2. 14.
게재확정 : 2012. 2. 22.

Key words :
decompression(DCS),
embolism,
inert gas narcosis,
oxygen balance

* E-mail : ryew@jeju.ac.kr

I. 서론

1. 연구의 필요성

잠수활동에서 가장 큰 관심사인 감압증에 미치는 증후군(decompression syndrome)으로서 엠볼리즘(embolism), 불활성가스의 마취(inert gas narcosis) 및 산소분압 비율(oxygen balance)의 기전을 들 수 있다. 비정상적인 잠수활동으로 인해 인체에 나타나는 감압증은 체내에 버블이 형성된 후에 나타나며, 특징에 따라 4가지 종류로 분류한다. 감압증과 관련하여 임상실험결과 및 이론을 요약한 선행연구는 드문편이지만, 동물을 대상으로 실험한 대표적인 연구는 Bennet P.B. and Elliot D.H.(1999), NAUI(1991) 및 Wienke B.R.(1994)을 들 수 있고, 국내에서는 전문다이버를 대상으로 실시한 연구는 류재청(2002), 류재청·이계산(2003), 류재청·이계산(2003)등을 들 수 있다. 이들의 감압증 이론 및 연구결과들을 정리하면 4가지의 특징으로 분류할 수 있다. 즉 전래적으로 신체에 나타나는 증상들을 기준으로 볼 때 Type I(사지벤즈, limb bends)은 사지에 국부적인 통증을 일으키며, 가려움, 홍반, 팽창 혹은 무릎, 엘보, 히프관절의 근육의 굳음 등의 증상으로 보인다. Type II(중추신경계벤즈, central nervous system bends)는 뇌, 척수 혹은 폐에 영향을 미치는 증후와 함께 혼수, 마비, 가슴부위의 통증, 호흡곤란, 무의식 등의 증상을 보인다. Type III(전정막 벤즈, vestibular bends)는 300fsw 범위를 초과하는 속도에 노출되었을 때 나타나는 청각장애, 현기증, 이명(울림과 부스소리) 및 메스꺼움 등의 증상을 보인다. 마지막으로 Type IV(이압성 골괴저증, dysbaric osteonecrosis)는 신체를 높은 압력에 반복적으로 노출함으로써 발생하는 골괴상, 구조적

상해 혹은 국부 무기질침착(local mineralization) 등의 증상을 보인다.

이러한 분류는 생·물리 기전(biophysical mechanism)에 따라 분류하고, 버블과 관련된 기전은 신체부위와 개인의 내성력에 따라 정도에서 차이를 보인다. 이러한 차이는 체내의 버블형성과정에서 무작위적 특성(random nature)과 매번 감압 후 발생한 버블에 대한 개인적 한계적 변이(variation) 때문이다. Bennet and Elliott(1999)는 개개인의 감수성의 차이에 영향을 주는 변인은 다양한 것으로 지적하였다. 이러한 변인에는 첫째, 연령이 높을수록 특히 40세 이상일 경우 DCS에 감수성이 더 높고, 둘째, 운동 중 및 후에 DCS 감염될 확률이 더 높다. 즉 운동 중에는 혼합가스 섭취량이 더 증가하고, 운동 후에는 체내에서 혈액의 흐름을 더욱 촉진시킨다. 셋째, 비만일수록 DCS에 노출될 확률이 높고, 혈관내 유체흐름의 평형을 유지함으로써 버블형성을 방해함으로써 DCS의 확률을 줄일 수 있다. 넷째, 알콜은 혈청표면장력(blood serum surface tension)을 감소시킴으로서 DCS의 발병율을 높이고, 다섯째, 기온이 더 추운 환경일수록 DCS의 감수성이 높다. 이외 높은 압력에 적응력이 좋을수록 DCS의 확률을 줄이고, 상해부위가 있을 경우 버블형성에 우선적으로 감수성을 가지기 때문에 주의가 필요하다.

II. 버블형성 및 하프타임 (half-time)이론

DCS 증후에 대해 병리생리학(pathophysiology)적 이론에 따르면 DCS 후 가스의 위상(gas phase)형성에 의존한다고 믿지만, 가스위상의 생리학적 기전에 대한 명확한 연구결과는 없는 실정이다. 체내 버블을 발견할 수 있는 기술 발달로 인해 움직

이거나 정지한 버블은 DCS를 유발시키고, DCS의 위험은 발견된 버블의 크기와 비례하여 증가한다. 거의 증상이 없거나 유동성이 적은 버블은 DCS 후에 나타나고, 가스위상형성의 다양성은 증후의 다양성보다 더 적을 수 있다. 즉 가스위상형성(gas phase formation)은 DCS를 이해하는 데 중요할 뿐 아니라 DCS의 이론과 산술과정에서 중요한 모델요인이 된다.

1. 할데인 이론(Haldane Theory)

감압증(Decompression sickness, DCS, Bends)은 дай버들 뿐 아니라 고각 및 터널공사 인부들에게도 발생할 수 있는 현상이다. 감압증 증세를 보이는 사람의 특징은 고대 그리스 사회의 여성들에게 인기가 좋았던 「Grecian bends」로 알려진 자세와 비슷한 「보행 시 등이 굽은 자세」로 알려졌다. 이 자세를 놀리던 동료들은 「The Bends」라는 DCS 증후의 명칭을 붙였다.

잠수시 체내의 조직들은 주변 환경압과 평형을 유지하려는 경향을 지닌다. 수면상태에서는 흡입되는 만큼 배출되는 가스의 평형상태를 유지한다. 따라서 신체조직은 순수 증가된 가스량은 없으며, 흡입과 배출은 평형을 이룬다. 이와 달리 잠수 시에는 배출되는 가스보다 흡입되는 가스가 더 많아짐으로서 신체 조직에서 가스의 순수증가량이 유발된다. 이 현상은 수면에 올라와서 주변 환경압과 평형상태를 이룰 때까지 지속 된다.

할데인에 따르면 FSW(feet of sea water)에서 33피트보다 얕은 수심에서 잠수는 감압증을 고려하지 않고 수면으로 바로 상승할 수 있다는 결론을 내렸다. 즉 33 FSW에서 평형을 이루는 신체 조직은 사고없이 수면 상승이 가능함을 의미한다(Fig 1 참조).

33 FSW로부터 수면에 상승하면 50% 감소된 압

$$\begin{array}{ccc}
 33 \text{ Feet} & = & 66 \text{ FSWA} \\
 \uparrow & & \uparrow & & = & 2 : 1 \\
 99 \text{ Feet} & = & 132 \text{ FSWA}
 \end{array}$$

Fig 1. The law of Haldane's ratio. (As long as the calculated pressure in any tissue was no more than twice the pressure at the next dive depth, the diver could be allowed to proceed to the next dive step).

력이다. 이 이론을 좀 더 확장 적용하면 신체 조직은 33피트에서 수면상승을 하든 99피트에서 33피트(66 FSW)로 상승을 하든 조직은 50% 압력감소에 견디어 낼 수 있다고 추론할 수 있다. 이 이론이 할데인의 "Haldane ratio of 2:1 pressure reduction"이다(Fig 2 참조).

$$\frac{P_{tissue}}{P_{external}} \leq \frac{2}{1} = \text{safe diving}$$

Fig 2. Haldane's observation of a 2:1 surfacing ratio applied to a change of depths without surfacing. If this theory was reasonable, a change of depth from 99 fsw to 33 fsw should also be safe.

할데인의 하프타임(half-time)이론은 특정조직이 질소로 50%포화되어지는데 소요된 시간이다. 뇌와 심장조직은 빠른 조직에 속하고, 빠르게 포화된다. 골격과 같은 포화가 느린 조직의 경우 느리게 포화된다. 각 유형의 조직에 대한 시간이 산출되었고, 이는 현대 감압이론의 근간을 이룬다.

인체는 한 유형의 조직으로 구성하지 않는다. 심장, 뇌, 근육, 골격, 혈관, 내장, 지방조직들은 인체 전체를 구성하는 조직이다. 각각의 조직들은 압력

에 대해 다르게 작용하고, 다른 비율로 가스를 섭취 및 배출하지만, 모든 조직은 평형상태를 유지하려는 경향을 가진다. 직접적으로 신체조직을 모델링하는 것보다 근육과 기타 다른 특정 조직들의 가스 섭취율을 측정함으로써 이론적인 신체 조직의 스펙트럼을 만들 수 있다.

특정 조직이 가스를 섭취 및 배출하는 속도는 HALF-TIME에 의해 측정될 수 있다. 조직의 하프타임은 조직이 초과하는 가스의 1/2을 배출하는 데 소요한 시간이다. 첫 하프타임 이후 가스의 1/2은 사라지고 나머지 1/2만 남게 된다. 두 번째 하프타임 이후 남아있는 가스의 1/2은 전체의 75% 만큼 사라지고, 세 번째 하프타임 이후 초과가스의 87.5%가 조직에서 사라진다. 6번째 하프타임 이후 초과 가스의 98% 이상이 사라지고, 이는 정상적인 상황에서 100%에 근접하는 비율이 된다(Figure 3 참조).

할데인은 신체 조직의 하프타임을 설정하는 과정에서 조직분할(tissue compartment) 하프타임 방식을 이용하였다. 즉 5, 10, 20, 40, 75 등의 방식으

로 분할하여 다양한 조직에서 가스압력을 산출할 수 있었다. 만약 특정 조직에서 절대압이 66FSWA를 초과한다면 다이버들은 바로 수면 상승하면 안 된다. 각각의 잠수 수심에 대해 안전정지를 할 수 있는 최대시간이 산출되어야 한다.

할데인은 단계적 감압방식 「stage decompression」을 제안하였고, 이 방식에서 다이버는 2:1비율을 초과하지 않고 최대로 얕은 안전정지점까지 상승할 수 있다. 다이버는 이 안전정지점에서 조직으로부터 가스가 충분히 배출될 때까지 머무른 다음 안전하게 수면으로 상승해야 한다.

지수증(exponential tissue)으로 흡입 및 배출되는 조직에서 가스 섭취와 배출. 가스 섭취의 6번째 하프타임 이후 조직은 외부의 압력에서 98.44%까지 포화가 되었다. 이와 마찬가지로 배출가스의 6번째 하프타임이후 조직은 수면압력에서 동일한 정도의 포화상태로부터 벗어나고, 각 조직은 가해졌던 포화잠수에 대한 느낌을 상실하게 된다(Fig 3 참조).

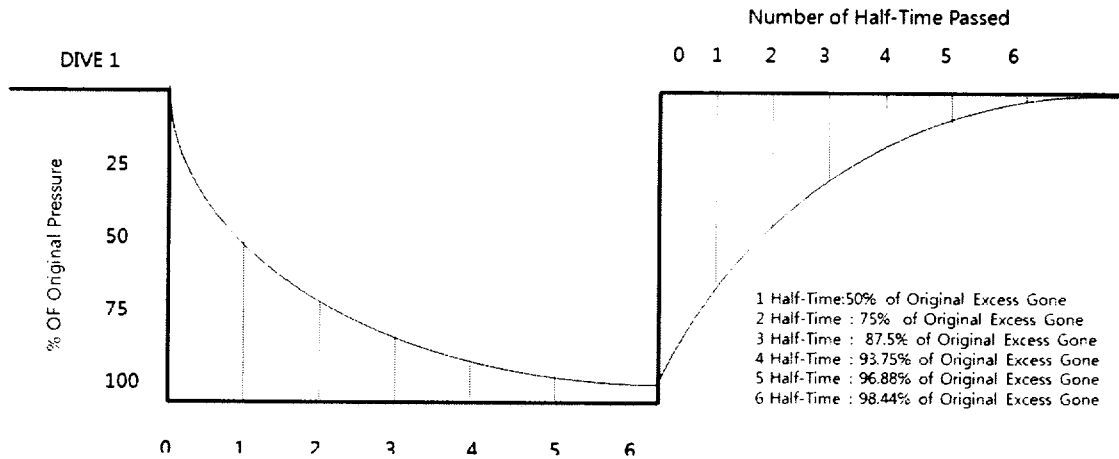


Fig 3. Uptake and outgasing in an exponential tissue.(After 6 half-times of gas uptake, the tissue is 98.44% saturated at the external pressure. Similarly, after 6 half-times of outgasing, the tissue is very nearly saturated at the surface pressure, and the tissue has lost its memory of the dive). NAUI(1991). Advanced Diving(Technology and Techniques) United States of Americal, NAUI 인용)

2. 할데인의 용해버블위상(dissolved-free phase) 이론

버블은 용해-버블 위상(dissolved-free phase) 이론에 따라 대기 압력이 조직의 장력보다 낮을 때 조직과 혈관에서 형성된다. 조직과 혈관에서 버블(free)가스와 용해(dissolved)가스 형성과 제거현상을 규명하는 것은 매우 복잡하다. 잠수에서 안전잠수 테이블을 위한 알고리즘을 개발하기 위해 필수적인 기전은 「용해된 가스와 함께 신체가 높은 압력에 지연된 시간동안 노출된 후 안전감압을 위한 가장 간단한 방법은 조직의 장력을 제한하는 것이다」. 전래적으로 Haldane이 이 기전을 처음 채택하였고, 현재까지 이를 응용한 방식을 사용하고 있다.

해수면에서 잠수를 위한 테이블과 프로파일을 제작한 최초의 이론적 모델은 영국 생리학자 Haldane J.S.(1908)에 의해 제안되었다. 즉 해수면 165 fsw(feet of sea water)의 수심에서 포화상태의 경우 감압을 연속하여 비등압의 1/2까지 제한할 경우 DCS는 발생하지 않았음을 발견했다. 이를 사람에게 적용하여 추정할 때 증후가 나타나기 전 두 요인에 의한 비등압보다 더 크게 상승한 용해가스 압력(elevated dissolved gas pressure, tension, 장력)에 견딜 수 있다고 여러 연구자들은 판단했다. 따라서 할데인은 임계초포화비율(critical supersaturation ratio)을 이론적인 세포조직 분할(hypothetical tissue compartment)을 두개로 제한하는 기준표(schedule)를 만들었다. 조직분할은 하프타임(half time, τ)에 근거를 두고 있고, 방사성물질의 붕괴와 같은 기하학적 진행과정과 연관시킬 때 반감기(half life)라 할 수 있다. 5개의 분할시간(5, 10, 20, 40, 75분)은 감압계산을 하는데 사용되고, 이는 50년간의 반감 진행 절차에 토대를 두었다.

그 후 1930년대 심해잠수를 수행하고 기존의 테

이블 범위를 확장하는 과정에서 미 해군은 각각의 세포조직 분할에 대해 각각 분리된 임계장력(limiting tension, M-value)을 할당했다. 1950년 후반에서 1960년 초반사이 다른 미 해군 연구자들은 처음으로 반복노출을 강조하면서 감압기준표(schedule)를 만드는 과정에서 각각의 조직분할은 다시 각각의 조직의 임계장력(limiting tension) 포함하는 6개 세포조직 분할(5, 10, 20, 40, 80, 120분)을 사용할 것으로 권고했다. 불활성가스의 일시적 섭취와 제거는 혈액과 조직사이 가스교환의 육안적인 관점에 토대를 두었다. 버블가스위상과 용해가스 위상(free and dissolved gas phases)의 상호작용과 상호이동 현상에 의한 정확한 버블생성기전은 잘 알려 지지도 이해되지도 않기 때문에 정량화 된 자료는 없다. 오늘날 용해와 버블위상역학(dissolved and free phase dynamics), 버블, 및 운반기전에 대해 밝혀졌지만 현재까지 여전히 할데인 모델에 의존하는 실정이다.

3. 할데인의 임계장력과 외귀식(critical tensions and gradients)

용해가스의 섭취와 제거율을 최대화시키기 위해서 p 와 p_i 간의 차이에 대한 변화기울기는 다이버가 수면에 근접한 잠수를 할 때 최대가 될 수 있다. 혈관류를 지배하는 조직장력(perfusion-dominated tissue tension, p)이 미 해군의 접근방식인 각 조직의 할당치인 임계치(M : 5,10,20,40,80,120분 조직하프타임, τ)를 초과하지 않도록 함으로서 위험을 감소시킬 수 있다.

임계장력은 할데인 모형에서 비등압과 비례하여 증가하는 압력의 선형함수이다. 분할이 더 빠를수록 더 많은 용해질소가 생성되고, 더 늦을수록 더 적게 생성된다. 잠수 시에 분할장력은 할데인 방식에서

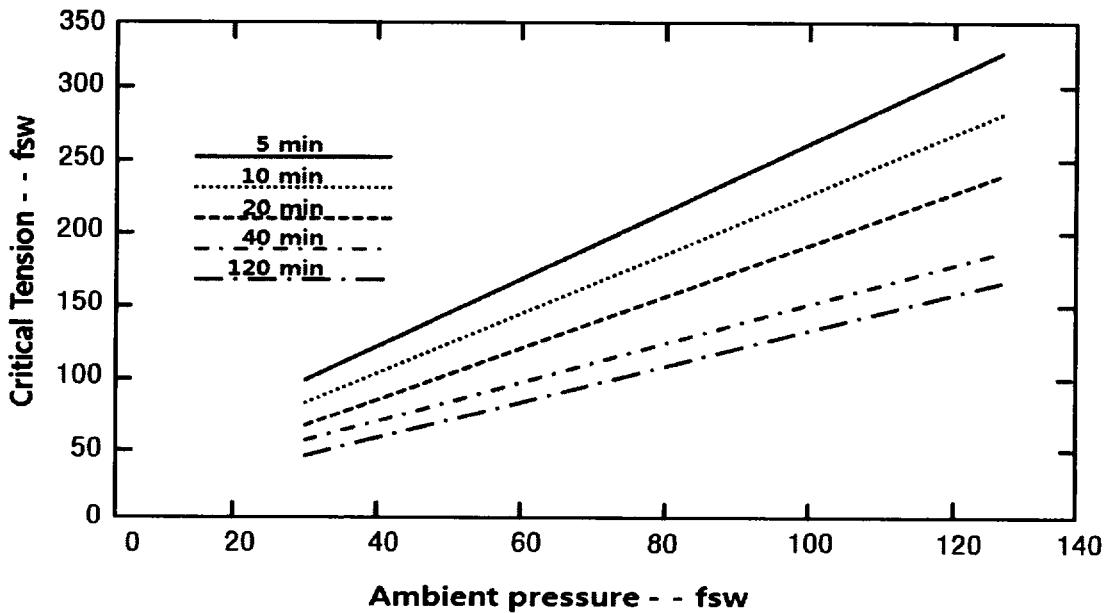


Fig 4. Perfusion Limited Nitrogen Critical Tension.((Wenke B.R.(1994). Basic Diving, physics and Applications. Best publishing company 인용)

$$M = M_o + \Delta Md \text{ --- --- --- 식1}$$

$$M_o = 157.7\tau^{1/4}$$

$$\Delta M = 325\tau^{1/4}$$

기술된 곡선보다 더 아래에 머물러야 한다. 임계장력은 다음 식과 같이 요약할 수 있다(Fig 4 참조).

수심 d (고지잠수일 경우 $p \leq 33$ fsw)에 따라서 선형 혹은 지수승으로 영향을 미친다. 선형일 경우 압력의 절편이 0 (0 pressure intercap)일 경우 +, 지수승의 경우 절편은 0이다. 무감압잠수(Nonstop time) 한계는 이 회귀방정식에 적용할 수 있다. 분

할을 위해 계속 발생하는 장력은 수면에서 최대값 (M_o)으로 대치할 수 있고, 모든 수심과 조직하프타임에 적용할 수 있다. 감압과 포화잠수에 적용하기 위해서는 임계장력에서 증가치로 추정가능하다. (즉 수심 d 에 대한 ΔM)(Fig 4 참조).

III. 혼합가스 분압과 노출 수심

수중에서 다양한 특수 목적을 위해 혼합 호흡가스를 사용하고 있고, 순수 공기와는 다른 혼합가스는 질소, 헬륨, 산소 및 공기보다 더 높은 산소분압으로서 얕은 수심의 잠수에서 많이 사용하고 있다. 질소/산소(nitrox), 헬륨/산소(heliox)와 헬륨/질소/산소(trimix)의 혼합방식은 심해 및 포화잠수에서 상업적으로 널리 이용되어져 왔다. 최근에는 수소/산소(hydrox)의 혼합가스도 사용하고 있는 실정이다

다. 다양한 목적의 잠수에서 이런 불활성가스의 사용이 인체에 미치는 가스의 속성, 이점, 단점과 상호작용들은 다양하다.

1. 생물학적 반응(biological reactivity)

60% 산소분압의 혼합가스로 12시간 이상 가압상태에서 호흡을 하게 되면 낮은 분압의 산소중독현상이 초래되어 폐 손상, 염증, 기침 등의 폐 중독 현상을 보일 수 있다. 높은 분압의 산소중독은 몇 분에서 몇 시간동안에 걸쳐서 1기압보다 높은 압력에서 순수산소로 호흡할 때 발생할 수 있다. 산소분압이 낮을수록 이러한 중후의 현상이 나타나는데 더 많은 시간이 소요된다(Table 1 참조). 산소중독의 현상으로서 근육의 움찔하는 수축, 경련 및 현기증현상은 신경계의 중독현상으로 분류한다. 또한 산소분압이 .16atm으로 떨어지면 무의식 중후를 보여 낮은 수준의 산소분압은 조직세포의 대사기능을 억제한다(hypoxia). 혼돈과 협응력, 어지러움 현상은 낮은 수준의 저산소중세로 구분한다. 심각한 저산소중(hypoxia)은 의료치료가 필요하다. 혼합가스 잠수에서 신중을 기해야 할 것은 산소분압의 비율이다. 섭취한 산소분압은 충추신경계(CNS)의 중독을 예방하기 위해 1.6기압(52. fsw)이하가 되어야

하고, 저산소중을 막기 위해서는 .16기압 (5.3 fsw) 이상이어야 한다. 즉 이 시간대는 약 44기압(47.5 fsw)로 제한한다. 산소분자 분압(mole fraction of oxygen)을 f_{O_2} 상하 한계 시간(d_{max} 와 d_{min}) 은 다음 fsw로 표현가능하다.

$$d_{max} = 52.8 / f_{O_2} - P_h$$

$$d_{max} = 5.3 / f_{O_2} - P_h$$

$$d_{max} - d_{min} = 47.5 / f_{O_2} \text{ --- 식 1}$$

따라서 적합한 수심은 $d_{max} \leq d \leq d_{min}$ 이 되어야 하며, 7천 피트 고도 잠수일 경우 d_{min} 은 어떠한 제약조건도 필요 없게 된다.

수중활동을 제약하는 다른 요인은 증가하는 비등압(대기압)에서 불활성가스의 마취효과를 들 수 있다. 잠수와 관련한 공통적인 가스, 질소 및 헬륨은 정상적인 대기압상황에서는 생리적으로 볼 때 불활성가스에 속한다. 이 가스는 부분압이 증가할 때 마취 효과를 보인다. 이 기전으로 손상된 폐에서 이산화탄소확산, 증가한 산소장력, 공포, 관련된 화학적 반응 등이 연관된 것으로 알려져 왔다. 80/20의 비율에서 질소의 증상은 거의 100 fsw에 가까우며, 더 심해이거나 헬륨의 경우라면 1,000

Table 1. Oxygen Depth-Time Limit(t_o)

oxygen depth $d(fsw)$	air depth $d(fsw)$	time limit $t_o(min)$
10	50	240
15	75	150
20	100	110
25	125	75
30	150	45
35	175	25
40	200	10

Wienke B.R.(1994). Basic Diving, physics and Applications. Best publishing company 인용

fsw의 범위에 달한다. 이의 증상은 가벼운 두통이나 무의식 수준을 보인다.

2. 혼합가스의 상대적 속성(Comparative properties)

질소는 잠수에서 불활성 가스로 분류된다. 200 fsw이상의 질소분압을 호흡함으로써 과도한 행복함 및 도취상태 빠지게 되고, 정신적 및 신체적 기능을 감소시킨다. 활동에 따라 개인적인 차이는 다르다. 증상은 심해잠수의 시작점에서 나타나기 시작하여 잠수시간이 경과함에 따라 점차 감소한다. 물 흐름의 저항과 추진방향에 대한 교란 등으로 인해 더 많이 호흡가스의 량을 증가시킨다. 심해잠수에서 질소분압이 더 높은 가스로 호흡을 할 경우 가스배기량이 상당한 수준으로 감소한다. 산소는 독성 때문에 심해에서는 제한을 둔다. 몇 시간 이상 잠수를 요구하는 300 fsw이상 잠수에서는 질소보다 더 가볍고, 약하고 중독성이 적은 가스를 사용하는 것이 필요하다.

수소(hydrogen), 네온(neon), 아르곤(argon), 헬륨(helium) 등과 같은 다양한 불활성 가스들로 실험 결과 가장 바람직한 가스로는 헬륨과 수소(hydrogen) 가스가 적합한 것으로 나타났다. 즉 무게가 가볍기 때문에 수소는 헬륨에 비하여 체내에서 제거속도가 이점인 반면 높은 폭발성을 지니기 때문에 심해와 포화잠수에서 불활성 가스로서 헬륨이

최적인 것으로 나타났다. 헬륨은 조직에 손상을 주지 않고 수 개월에 걸쳐 사용할 수 있다. 아르곤은 질소보다 더 쉽게 용해되고 더 무겁기 때문에 심해잠수에서 적합하지 않다. 네온의 경우 질소보다 무게에서 큰 차이는 보이지 않지만 헬륨에 비해 약간 더 용해성을 띤다. 이 5개 가스 중 가장 많은 마취를 유발하는 것은 아르곤이고 헬륨은 가장 적은 마취효과를 보인다.

불활성가스의 포화(saturation) 및 불포화(desaturation) 속도는 원자질량에 대한 제곱근 자승으로 반비례한다. 수소는 질소보다 3.7배 빠르게 포화 및 불포화된다. 헬륨은 질소보다 2.7배 빠르게 포화 및 불포화한다. 네온, 아르곤, 질소사이의 차이는 잠수에서 큰 의미가 없다. 원자질량단위로 용해도(Solubility)는 atm-1, 무게는 A, 상대적인 마취잠재력(V)는 무차원(관측된 마취정도)이라 할 때 하이드로젠, 헬륨, 네온, 질소, 아르곤, 산소의 마취잠재력을 비교한 결과는 (Table 2 참조)와 같다.

다양한 불활성가스들에 의해 형성된 버블의 크기는 용해된 가스의 량 즉 용해도에 좌우된다. 더 높은 용해도를 가진 가스는 더 큰 버블을 형성한다. 따라서 헬륨은 가벼운 가스로서 수소와 친화력을 가지고, 질소는 무거운 가스로서 아르곤과 더 높은 친화력을 가진다. 네온용해도는 거의 질소용해도와 비슷하다. 마취잠재력은 지방조직용해도와 상관을 가지며, 최소의 마취 가스는 최소의 용해도를 가진다.

Table 2. Inert Gas and Oxygen Molecular Weight, Solubility and Narcotic Potency

	H ₂	He	N ₂	N ₂	Ar	H ₂
A(amu)	2.02	4.00	20.18	28.02	39.44	32.00
S(atm bloodood)	.0149	.0087	.0093	.0122	.0260	.0241
oil	.0502	.0150	.0199	.0670	.1480	.1220
V	1.83	4.26	3.58	1.00	.43	

Wienke B.R.(1994). Basic Diving, physics and Applications. Best publishing company 인용

각각 다른 가스 섭취량과 배출량의 속도는 헬륨과 질소혼합가스를 사용함으로써 감압시간을 줄이는데 최적수단이 된다. 헬륨으로 호흡하면서 300fsw를 초과한 심해다이빙 후 질소로 호흡하면 위험요인이 없지만 조직에서 헬륨증가는 혼합공기로 호흡할 때 증가하기 때문에 헬륨배출을 증가시킨다. 헬륨대신 질소로 대치한 후 산소분압을 증가시킴으로써 질소섭취량을 낮은 수준으로 유지할 수 있다. 따라서 가스교환의 가능한 결합은 상승속도를 조절하는 노출시간과 조직분할(tissue compartment)에 좌우된다.

심해 포화잠수에서 헬륨 혹은 질소(normoxic)의 혼합가스는 산소와 관련된 문제점을 뒷받침할 수 있는 기초가 된다. 헬륨 혹은 질소(normoxic) 혼합가스인 헬륨과 질소는 산소의 비율을 상대적으로 줄이면서, 활동수심에서 산소의 부분압은 저산소성(hypoxia) 및 중독성(toxicity)에서 해수면과 동일한 감압 확율을 가진다.

임계장력(critical tension)은 질소잠수에서와 같은 방식으로 헬륨포화 잠수에서도 적용할 수 있다. 임계장력은 하프타임의 이론적 조직분할(hypothetical tissue compartment)의 가설을 위한 불활성가스장력의 최대 허용치(M-value)가 된다. 조직분할에서 헬륨교환을 위한 접근법은 2.7로 감소한 하프타임을 가지는 일반적인 질소를 이용한다. 즉 헬륨하프타임은 2.7이후의 질소하프타임으로부터 나온 값이 되고, 동일한 임계장력은 두 가스의 분할된 값을 적용한다. 이러한 접근법을 도대로 한 프로파일(schedule)을 여러 연구자들은 재평가해왔다. 조직장력의 척도는 어떤 혼합가스에서 불활성가스의 상대적인 비율로 정한다. 공기에 의존한 잠수 이외 혼합가스잠수와 감압의 산출방식을 이해함으로써 컴머셜 잠수 분야에서 활용할 수 있는 정보가 될 수 있다.

헬륨(80/20)의 무감압한계시간(nonstop time limit)은 질소보다 더 짧다. 즉 질소에 대해 질소와 비슷한 $t^{1/2}$ 의 법칙을 따른다. 즉 「수심(depth) X 무감압한계시간의 제곱근」은 거의 일정하다. (depth times the square root of the nonstop time limit is approximately constant) 무감압 한계시간으로부터 임계장력의 표준 산출기법을 이용하여 분할임계장력을 산출할 수 있다. 다양한 방식으로 흡수하는 모델과 같이 현대 버블모델은 헬륨잠수에서 전략적으로 사용하고 있다.

오늘날 3개의 헬륨, 질소혼합가스(nitrox, heliox, trimix)로 심해와 포화잠수에서 활용되고 있고, 얕은 수심(레크리에이션)에서 산소가스를 혼합하여 사용하고 있다. 레크리에이션 잠수에서 산소혼합가스의 이용은 다이버의 안전을 위해 주의가 필요하다. 혼합가스로 호흡을 하는 과정에서 혼합가스비율의 정확한 평가, 산소중독성, 적절한 감압절차가 혼합가스를 이용하는 다이버들에게 주의가 요구된다. 즉 산소는 인체에 위험요인이 될 수 있고, 4개의 수소혼합가스 4-hydrogen mixture (hydrox)는 더 큰 위험을 초래할 수 있다.

1) 나이트록스(Nitrox)

21% 이하의 산소로 질소와 산소의 혼합가스를 사용함으로써 적절한 심해(100ft 이내 수심)와 포화잠수에서 산소중독증을 예방할 수 있다. 저산소증은 15% 정도 산소 혼합가스로서 산소분압이 낮은 나이트록스의 포화잠수는 신중한 잠수 계획 후에 이루어 져야 한다. 즉 100 fsw에서 200 fsw의 범위에서 질소마취효과는 심해잠수에서 나이트록스 잠수의 영향을 감소시킨다.

나이트록스 혼합가스 잠수는 산소중독성 때문에 신중하게 잠수 프로파일을 세워야 한다. 30%이상 산소 혼합가스는 질소의 부분압을 공기잠수와 비교

해서 조직장력을 낮출 수 있는 정도까지 질소의 부분압을 감소시킨다. 만약 표준공기압정치를 이용한다면, 가압 나이트록스로 안전잠수를 할 수 있다. 그러나 높아진 산소분압으로 인해 최대허용수심은 특정 가압산소혼합가스(enriched oxygen mixture)를 지정하는 것이 필요하다. 산소분압한계로서 1.6atm(52.8 fsw)에서 잠수를 할 경우 어떤 혼합가스에 대한 최대허용수심을 산출하면, 32%산소혼합 나이트록스 잠수는 130 fsw의 수심이 된다. 이 수심을 산소임계점(oxygen limit point)이라 한다. 더 많은 분압을 지정할 경우 가능 수심은 비례하여 더 깊어진다.

가압 나이트록스 잠수에서 감압의 필요성은 질소용량이 79%이하로 감소하기 때문에 공기의 경우에 비해 덜 요구된다. 공기임계장력(air critical tension)은 지수승으로 비례하고, 질소조직가스교환(nitrogen tissue gas exchange) 혹은 비등공기 수심(equivalent air depth, 가압 나이트록스의 실제수심보다 항상 적음)을 산출하는 배출 식은 공기를 이용하는 테이블로 산출이 가능하다.

2) 헬리옥스(Heliox)

선행 연구자들에 의해 수백 피트 수심에서 질소 마취영향에 덜 민감하게 하는 호흡가스의 효과를 연구하였다. 마취영향과 지질의 용해도사이 상관을 분석하기 위한 실험에서 호흡가스로서 최소한의 마취 호흡가스로서 헬륨으로 결론을 내렸다. Bennet (1999)에 의하면 질소보다 4배 더 적은 마취효과를 가지며, 이의 산출 요약은 (Table 1)과 같다. 심해 포화잠수와 지연된 체류 잠수(extended habitat diving)(헬륨과 산소혼합가스, 미해군, 1,000ft 이상의 수심)에서 이점 때문에 헬리옥스 잠수 시대를 더욱 촉진시키는 계기가 되었다. 가스의 가격은 비싸지만 700fsw이상의 심해와 포화잠수에서 사용가능한

혼합호흡가스로서 최적임이 증명되었다. 헬륨의 흡수와 배출은 질소의 경우에 적용한 할데인 지수승 이론(Standard Haldane exponential expression)으로 증명할 수 있지만, 헬륨하프타임은 동일한 이론적인 조직분할에 적용하는 질소보다 2.7배 더 빠르기 때문에 다소 차이가 있다. 따라서 포화잠수에서 180분 헬륨분할은 질소분할의 480분과 같은 효과를 가진다.

헬리옥스로 심해와 장시간잠수에서 감압시간을 최적화하기 위해 상승 시에는 질소로 대체하는 것이 유리하다. 느린 조직분할(slow tissue compartment)에서 헬륨의 포화가 더 높을수록 질소호흡환경으로 변화과정은 더 느리다. 질소부분압의 점진적 증가로 인해 헬륨소모(helium washout)를 증가시킬 뿐 아니라 이와 동일한 분할에서 질소흡수를 최소화시킨다. 이와 비슷하게 산소분압에서 점진적 증가는 모든 불활성가스의 소모를 촉진시키지만 저산소증에 주의를 해야 한다.

헬륨호흡환경에서 흥미로운 문제점은 높아진 음의 변화 때문에 다이버간의 통신을 위해 전기적 장치로 신호의 증폭변환이 필요하다. 헬륨은 질소와 달리 진공튜브, 게이지, 전기적 장치를 손상시킨다. 비록 헬륨이 심해잠수로서 적합하지만, 질소는 감압을 용이하게 하고, 목소리의 문제점을 해결해주고, 다이버의 체온을 따뜻하게 유지하게 하는 데 도움이 된다.

3) 트라이믹스(Trimix)

헬륨으로 1400 fsw 이하에서 잠수를 하는 것은 비현실적일 뿐 아니라 매우 위험한 상황을 초래한다. 높은 압력에서 신경의 이상 증상(High pressure nervous syndrome, HPNS)은 심해잠수에서 하강 시에 큰 문제를 야기 시키게 된다. 헬륨에 질소를 혼합한 호흡가스(trimix)는 HPNS의 증상을 개선하

는 데 유익하다. 트라이믹스는 500 fsw에서 2,000 fsw의 수심에서 유용한 호흡가스이며, 이 때 마취효과 때문에 질소비율을 10%미만으로 혼합한다.

트라이믹스에서 감압에 대한 문제는 전래적인 방법으로 해결할 수 있다. 헬륨과 질소의 섭취와 제거율은 임계장력(critical tension)으로 제한할 수 있다. 기본단위의 질소하프타임(nitrogen halftime)과 임계장력과 동일한 질소분할을 위해 약 3배 헬륨하프타임을 사용함으로써 전체 불활성가스 섭취와 제거량은 트라이믹스 혼합 호흡가스에서 헬륨과 질소의 분할의 합과 동일하다.

4) 하이드록스(Hydrox)

수소(hydrogen)는 가장 가벼운 가스이기 때문에 호흡 시 가장 작은 호흡저항을 유발하고, 수심에서 폐 내의 산소와 이산화탄소의 교환을 촉진시킨다. 용해성(solubility)과 확산성(diffusivity)을 고려할 때 혈관과 조직에서 질소의 섭취와 제거율은 질소 혹은 헬륨보다 훨씬 더 빠르다. 실제로 수소의 효능은 잠수에서 불활성가스 호흡 가스로서 질소와 헬륨보다 못하다.

수소/산소 호흡혼합가스의 잠재적인 이점에도 불구하고 대부분의 가스의 폭발성 때문에 하이드록스의 사용을 기피한다. 그러나 초기 연구(Bureau of Mine, 1950년대)에서 3%-4% 이하의 산소 비율은 화염이나 폭발성의 위험에 대해 안전한 것으로 규명되었다. 수소/산소 비율이 97/3 혼합가스는 200 fsw 정도의 얕은 수심에서는 산소부분압과 수심압이 동일하기 때문에 안전하게 사용할 수 있다. 쥐를 대상으로 실험한 결과 수소 중독확율은 질소보다 작지만 헬륨보다는 더 큰 것으로 나타났다. 헬륨과 달리 수소는 상대적으로 구입이 쉽고 가격이 싸다.

5) Haldane 방정식의 적용(Haldane Modification)

혼합가스의 경우(질소, 헬륨, 수소) 할데인의 접근방식의 기본 변인인 질소임계장력(nitrogen critical tension, M)과 하프타임(τ)을 토대로 일반화시킬 수 있다. 가스 종류로서 $j=N_2, He, H_2$ 원자질량을 A_j 부분압을 P_j 로 가정하면 변화된 수정계수(rate modified coefficient, λ_j)에 따라 각각의 성분들은 할데인의 조직방정식을 충족시킬 수 있다. 즉

$$P_j - P_{aj} (P_{ij} - P_j) \exp(-\lambda_j t) \dots \text{식 2}$$

j^{th} 종류의 가스에 대한 p^i, p^j 의 비등압과 부분압 및 붕괴상수(decay constant, λ_j)는 질소계수(nitrogen coefficient)에 대한 Graham의 법칙($\lambda_{N_2}=\lambda$)과 관련성을 가진다.

$$\lambda_j = \left[\frac{A_{N_2}}{A_j} \right]^{1/2} \lambda \dots \text{식 3}$$

즉

$$\lambda_{He} = 2.7 \lambda$$

$$\lambda_{H_2} = 3.7 \lambda \dots \text{식 4}$$

임의의 불활성혼합가스 j 에 대해 감압에 필요한 조건은 모든 수심에서 적용할 수 있는 식5와 같다.

$$\sum_{j=i}^j p_j \leq M \dots \text{식 5}$$

전체압력에 대한 비등부분압(p_{aj})를 부분압(f_j)으로 가정하면

$$p_{aj} = f_j p \dots \text{식 6}$$

이 식은

$$f_{CO_2} + f_{H_2O} + f_{O_2} + \sum_{j=1}^j f_j = 1 \text{ --- 식 7.}$$

에 적용이 가능하다.

즉 <식 7>은 최소의 오차를 줄이기 위해 혼합가스에 포함된 이산화탄소와 수증기성분까지 포함한 식을 의미한다. 종종 이산화탄소와 수증기부분압은 무시되기도 한다. 따라서 75/25% 나이트록스에서 $f_{N_2}=75, 90/10\%$, 의 헬리옥스에서 $f_{H_2}=75, 10/15\%$ 의 트라이믹스에서 $f_{H_2}=75, f_{N_2}=10$ 이 되고, 95/5%의 하이드록스에서 $f_{H_2}=95$ 가 된다. 순수공기에서는 $f_{N_2}=79\%$ 가 된다. 이러한 호흡가스의 처리는 각각 분할τ에 대해 질소데이터로부터 유도된 단일의 임계장력(single critical tension, M)으로 가정한다.

$f_{N_2}<79$ 의 나이트록스에서 질소감압조건은 동일한 M 세트를 적용함으로써 감소될 수 있다. 즉 M 공기세트(set of M)는 공기와 기타 질소혼합가스에 동일하게 적용되어진 것으로 가정한다. 이 과정은 정맥에서 헬리옥스, 트라이믹스 및 하이드록스의 혼합가스에 적용된다. 어떤 혼합가스에서 중요한 제약점은 산소의 상수로서 산소의 부분압이 중독성을 피하기 위해 $52.8 \text{ fsu}(1.6\text{atm})$ 이하로 유지해야 한다. 점점 증가하는 수심에서 이러한 범위 내에서 다이버의 이동성을 지속하게 하는 것은 복잡한 절차를 요구한다.

6) 비등대기수심(Equivalent air depth)

기타 혼합가스호흡을 위한 혼합공기 테이블을 이용하여 비등공기수심방법(equivalent air depth method)을 이용할 수 있다. 테이블 사용을 위한 비등압력수심방법은 부여된 대등한 혼합 및 불활성가스 부분압으로 유도되고, 고도비등수심방법(altitude equivalent depth method)과 유사하다. 예를 들면 나이트록스 혼합가스에서 비등공기수

심(equivalent air depth, δ)은 동일한 질소부분압을 부여함으로써 유효수심과(d)과 관련성을 알 수 있다.

$$f_{N_2}(P_h + d) = .79(P_h + \delta) \text{ --- 식 8}$$

수면비등압(surface ambient pressure) P_h 로 정리하면

$$\delta = \frac{f_{N_2}}{.79}(P_h + d) - P_h \text{ --- 식 9}$$

고도에서 유효수심(effective depth, d)는 앞서 기술하였듯이 해수면에서 동일 수심(equivalent depth)이고, 해수면에서 실제수심(actual depth)과 유효수심(effective depth)은 동일하다.

혼합가스($f_{N_2}=79$)로 사용할 때 동일공기수심 equivalent air depth (δ)은 유효수심보다 더 적게 된다. 따라서 질소감압조건은 어떤 공기테이블세트를 이용하기 위해 δ를 사용하면 감소하게 된다. 따라서 동일한 임계장력(M-set)는 공기와 기타 혼합가스에 동일하게 적용되는 것으로 간주한다.

$$\delta = \frac{f_{N_2}}{.79}(33 + d) - 33 \text{ --- 식 10}$$

실제수심 d는 해양잠수에서 폭넓게 이용되어왔다. 이의 절차를 다양한혼합 가스(heliox, trimix, hydrox)에 적용할 수 있다. 동일한 가스 성분(헬륨, 질소, 수소, 산소)으로 표준 테이블로부터 확장하여 이용가능하다. 즉 혼합가스 표준테이블에서 불활성 가스 분자량을 (f_k), $k=N_2, He, H_2$ 로 하고, 임의의 혼합가스 분자량(f_k)이라 하면 식 11과 같다.

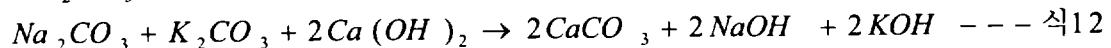
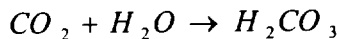
$$\delta = \frac{f_k}{f_{ks}}(P_h + d) - P_h \text{ --- 식 11}$$

3. 산소재호흡(oxygen rebreathing)

1880년 초기 경에 Fleuss라는 학자는 처음으로 폐쇄회로 산소재호흡시스템(closed circuit oxygen rebreathing system)의 개발 및 검증을 하였다. 비록 호흡하는 순수산소의 영향은 흥분과 체온을 높인다는 인식 정도였지, 그 당시 산소중독에 대한 완전한 이해가 되지 않은 상태였다. 그 후 세계 2차 대전 동안 장비가 많이 세련되고, 다양하게 활용되었다. 그 후 1950년대 동안 레크리에이션 다이버들은 산소 재호흡기를 사용하였다.

폐쇄회로 시스템에서 배출가스는 장비 시스템 내에 머물러있고, 화학물질에 의해 이산화탄소를 제거시키고, 다시 다이버가 호흡을 하게하는 시스템이다. 외부로 가스가 방출하지 않기 때문에 버블이 전혀 없는 것이 특징이다. 가스소비는 단지 생리적인 산소소비량과 상관을 가지고, 지연된 수중활동시간을 위해 소량의 산소만으로도 가능하다. 산소는 호흡 백으로부터 직접 흡입되고, 배출 가스는 알카린(Alkaline)과 흡수물질을 통해 분리되어 통과한다. 이 과정에서 이산화탄소는 제거된다. 대표적인 감소요인은 수증기(water vapor), 소듐(sodium), 포타슘 하이드록사이드(potassium hydroxide), 이산화탄소 등을 포함한다(식 12 참조).

재호흡기를 사용할 경우 일반적으로 산소 6m³ 과 흡수물질 4lbs로서 약 3시간동안 지속하여 사용할 수 있다. 잠수 수심으로 인해 산소중독증의 확률로 산소 재호흡기 사용에 대한 주의가 필요하다.



IV. 종합 및 제언

본 고찰은 다양한 목적으로 수중활동을 하는 동안 위험요인으로서 작용하는 감압증(DCS)에 대한 이론과 이를 예방할 수 있는 여러 대안을 선행연구를 통하여 정리 및 제시함으로써 수중활동시 위험요인을 이해함으로써 안전 수중활동을 도모하는데 있다. 감압증의 현상은 엠블리즘, 불활성가스마취, 혼합가스의 비율에서 발생하는 증상 들을 들 수 있다. 감압의 증상을 예방하기 위한 대안으로서 혼합 호흡가스를 들 수 있고, 이에 주로 포화잠수에서 사용하는 질소, 헬륨, 산소, 순수공기, 수소 등의 가스의 장단점과 혼합비율로 압축이 된다. 이러한 가스의 비율에 따라서 나이트록스, 트라이믹스, 헬리옥스, 하이드록스 잠수로 구분하며, 수중에서 얼마나 효율적인 작업이 이루어지고, 혹은 위험 상황을 초래하느냐에 대한 임상적 실험이 필요한 상황에 있다. 앞으로 이루어져야할 실험은 선행연구의 결과를 토대로 포화잠수에서 쿼드록스 혼합가스(quadrox; nitrogen/hydrogen/helium/oxygen mixtures)의 효과에 대한 임상실험을 통하여 더 안전하고 효율적인 잠수활동을 할 수 있는 검증이 필요하다.

참고문헌

- 류재청(2002). 잠수활동에서 활동수심과 시간에 따른 잠수증(질소마취)에 미치는 요인의 정량화와 예방법. *한국체육학회지*, 41(1), 575-591.
- 류재청, 이계산(2003). 수중작업 수행능력에 미치는 요인의 정량적 분석. *한국체육학회지*, 42(2), 449-461.
- 류재청, 이계산(2003). 수중활동에서 과제수행능력 결함에 미치는 운동학적 요인의 분석. *한국체육학회지* 42(3), 687-695.
- Bennet P.B. and Elliot D.H.(1999). Inert gas narcosis. *The physiology and medicine of diving, 4th*. 170-190, Ed. P.B. Bennett and D.H. Elliot, Saunder.
- Haldane J.S.(1908). *Respiration*. New-Haven, CT; Yale University Press.
- NAUI(1991). *Advanced Diving(Technology and Techniques)*. United States of American (NAUI), 131-139.
- Shilling C.W., Carlston C.B., Mathais R.A.(1984). *The Physician's Guide to Diving Medicine*. Plenum Press · New York and London, 35-68.
- Wienke B.R.(1994). *Basic Diving physics and Applications*. Best publishing company, 125-130, 195-203.