

## 잠수활동의 수심과 압력변화로 인한 생리적 질환과 처치법에 관한 연구

임관철<sup>1)</sup>

### Prevention & Treatment for Physiological Impairment by Depth(pressure) Change in Underwater Activity

Im, Kwan-Chul

#### ABSTRACT

The purpose of the study was to suggest treatment & prevention of factors influencing to Diving symptom(nitrogen narcosis, decompression, arterial gas embolism)according to activity depth and bottom time.

Decompression sickness (DCS) results from gas coming out of solution in the bodily fluids and tissues when a diver ascends too quickly. This occurs because decreasing pressure lowers the solubility of gas in liquid. Also, the expansion of gas in the lungs may lead to alveolar rupture, which in turn, result in arterial gas embolism (AGE) was leaded a major cause of death in diving and the initiating cause (pulmonary barotrauma) usually goes undetected. Caused most often by the expansion of respiratory gases during ascent. DCS, AGE called to be decompression illness." Joint pain is the most common complaint in DCS, especially in the elbow, shoulder, hip and knee. Blockage of vessels results in ischemia and infarction of tissues beyond the obstruction, and inflammatory changes can lead to extravasation into the tissues, resulting in edema and further compromising the circulation. Decompression sickness is treated with recompression in a chamber to 60 FSW or deeper, associated with hyperbaric oxygen breathing. therapy is usually guided by a Navy Treatment U.S Navy Table. These tables are very effective, especially when recompression is begun promptly.

#### 1. 서론

지구 표면에서 인간은 대기권내의 다양한 가스의 분압의 결과인 환경압(ambient pressure)에 노출되어 적응하고 있다. 해수면에서 이 압력의 힘은 1 대기 절대압으로 기술된다. 반면 다이버가 특정 수심으로 하

---

1) 제주대학교 체육학과 강사

강할 때 증가하는 압력에 노출됨으로써 가스의 법칙에 따라서 체액과 조직에 질소가 용해되고, 상승 시 급상승하게 될 경우 혈액 속에서 질소가 갑작스런 압력변화로 버블을 형성하게 되어 감압증(DCS) 혹은 폐포파열(폐과팽창증후, POIS), 동맥순환과정에서 동맥가스색전증(arterial gas embolism, AGE)을 유발한다.

이러한 감압증, 동맥가스 색전증 등의 현상을 감압증(decompression sickness)이라는 용어로 일관하고 있다. 이의 치료방법은 공기 혹은 공기-헬륨의 적절한 혼합을 이용한 챔버에서 재감압 과정으로 이루어진다. 갑작스런 압력변화로 버블은 혈관에서 발생하여 색전증과 경색을 유발할 수 있고, 근육조직에서는 염증을 유발할 수 있다. 특히 레크리에이션 스쿠버 다이빙은 자가수중호흡장치의 개발로 고압에 노출되는 가장 흔한 예가 될 수 있다.

고압 챔버에서 산소 분압의 조절로 감압증, 동맥가스 색전증, 일산화탄소 중독, 외상, 당뇨병성 하지궤양(diabetic leg ulcer), 열화상, 괴사성 조직감염(necrotizing soft tissue infection), 골수염(osteoradionecrosis), 불응성 골수염(refractory osteomyelitis) 등을 치료할 수 있다.

고압에 노출현상은 고압 산소치료시설, 고공과 터널 공사 과정에서 발생할 수도 있다. 고공의 경우 상승에 따른 기포형성과 압력과 과포화 감소에 따른 역전된 상황을 제외하고는 다이버의 경우와 동일하다. 지상으로 내려올 때 다시 압력이 증가하는 재감압과 유사한 개념이다. 그러나 감압증 증후는 지상에 되돌아온 후에 발생할 수 있고, 가끔 추가적인 재압이 필요하다. 즉 수중에서 인체에 영향을 미칠 수 있는 요인은 압력의 변화로 인한 하강시 질소마취(nitrogen narcosis)와 상승시 감압증(decompression sickness)을 들 수 있으며, 이 두 증상은 그 정도에 따라 신체에 휴유증에서 사망까지 진전될 수 있다.

스쿠버 다이빙 활동은 그 목적에 따라서 스포츠 다이빙, 레크리에이션 다이빙, 산업다이빙, 군사다이빙, 컴머셜다이빙 등을 들 수 있다. 이중 가장 두드러지게 생활 속의 대중 스포츠로 자리를 잡아가면서 그 인구는 매년 30-40%의 증가추세에 있다.

또한 수중에서 이루어진다는 위험요소에도 불구하고 최근에 들어 선호하는 여가활동 영역으로서 3면이 해양인 우리 나라의 경우 해양관광레포츠의 일환인 수중레저스포츠 관광 인구도 급증되어 보편화된 실정이다. 이러한 추세에서 보다 안전한 참여형 수중관광으로 건강과 생활 만족도를 향상시킬 수 있는 안전사고의 예방과 관리 대책이 필요하다.

따라서 본 연구는 수중에서 다양한 목적(수중레저관광, 해녀작업, 산업잠수 등)으로 잠수활동을 할 경우 인체 생리적인 질환을 예방하기 위한 방편으로 관련된 문헌 연구를 토대로 추후 잠수활동과 관련된 심도 있는 정량적인 연구를 하는 데 기초자료를 제시하는 것이다.

## II. 수중압력변화와 생리적 결합

### 1. 압력변화

해수면에서 신체는 1기압에 노출되어 있으며, 이는 수은주의 760mm(mmHg), 해수의 33피트(feet of sea water, FSW) 혹은 14.7 psi에 해당된다. 즉 다이버의 수심 게이지가 수면에서 0으로 판독되지만 절대압 2기압에 있게 되는 수중의 33피트 즉 33FSW 혹은 1기압에 노출되어 있는 셈이다.

액체로 채워진 고체의 기관에서 액체가 압축을 받을 수 없기 때문에 압력이 변함에 따라서 형태의 크기가 불변한다. 그러나 공기로 채워진 탄성벽을 가진 공간은 보일의 법칙(Boyle's law)에 따라서 형태가 변화한다. 즉 가스의 양은 절대 압에 반비례함을 뜻한다. 예로서 수면(1기압)에서 공기가 1평방피트(cubic

feet)로 채워진 고무풍선은 33FSW(2기압)에 처하게 되면 1/2 평방피트의 양으로 감소하게 되고, 99FSW(4기압)에서 1/4 평방피트로 감소한다.

보일의 법칙(Boyle's law)에 의하면 가스의 양은 온도가 일정할 경우 수면으로 상승시 절대압에 반비례하므로 다이버는 체내의 가스를 배출 못할 경우 공기가 팽창하여 미세한 폐포를 파열시킬 수 있다 (<http://www.mtsinai.org/pulmonary/books/scuba/contents.htm>).

다이버들은 상승시 배기가스를 정상적으로 배출하지 않으면 팽창하는 공기가 미세한 폐포를 파열시키게 되고, 하강시에 귀의 펌핑작용으로 파열을 방지하기 위해 중이에 공기를 더 가하게 된다. 만약 압평형이 이루어지지 않으면 압력은 귀의 스퀴즈현상, 폐에서는 폐포 혹은 폐포파열(POIS) 및 동맥가스색전증(AGE)을 유발시킨다.

다이버들은 하강시 귀의 펌핑작용으로 중이 부위에 공기를 불어주어 파열을 방지한다. 만약 압평형이 이루어지지 않으면 귀에서 스퀴즈가 발생하고 고막이 신체 안쪽으로 밀려들어가면 유스타키오 관(Eustachian tube)이 혈액과 체액에 의해 차단된다.

수중에서 압력변화와 감압증은 헨리의법칙(Henry's law)과 달톤의 법칙(Dalton's law)에 따른다. 헨리의 법칙에 의하면 특정 온도에서 액체상태로 용해될 가스의 양은 가스의 부분압에 직접적으로 비례하고, 달톤의 법칙에 의하면 특정 가스의 분압은 현존하는 모든 가스의 부분압의 합이다. 즉 대기가스의 78%를 차지하는 불활성가스인 질소는 스쿠버 다이버의 혈관이나 기관에서 가스법칙을 따를 때 부작용을 유도하는 가스이다. 탱크의 가스로 호흡을 하면서 하강할 때 증가된 압력으로 수면에서 보다 더 많은 질소가 조직 속으로 스며들게 된다. 충분한 질소가 신체조직에 용해된 상태에서, 수면으로 급상승하게 될 때 가스는 폐에서 서서히 배출되지 못하고, 질소는 용해된 상태에서 가스형태로 변화하여 신체의 혈관과 조직에서 버블을 형성하게 된다. 이 때 발생한 버블이 감압증(DCS)이라 부르는 임상적 실체이다.

## 2. 가스 색전증(gas embolism)종류와 발생원인

### 1) 동맥가스 색전증(arterial gas embolism)

AGE는 버블이 혈관에서 발생할 수 있는 장애현상이다(Behnke,1931). AGE에서 버블은 혈관과 조직에서 가스의 과포화로부터 생기는 것이 아니라 상승시 과팽창으로 폐포의 파열로부터 발생한다. 이 버블은 폐의 정맥으로 들어가 심장과 동맥시스템 순환계로 유입된다.

폐모세혈관에서 가스의 버블링 결과 폐정맥에서 심방 좌측으로 흐르면서 관상동맥 색전증 혹은 경동맥과 척추동맥-뇌동맥까지, 소뇌동맥 색전증 등을 유발한다.

소뇌 가스색전증의 임상적 현상은 국부적인 혈관의 차단으로 갑작스런 무의식 상태를 초래하고, 혼돈, 현기증 등의 현상을 보인다.

기타 임상적 현상은 반신불수(hemiplegia), 국부적 허약성, 지각감퇴증, 시야 결함, 시각 결함, 두통 및 뇌신경 손상 등을 포함한다. 이러한 증후의 증세는 거의 갑자기 발생하기 때문에 신경학적인 감압증에 의해 발생한다. 소뇌 가스색전증의 또 다른 기타 발생가능성(unusual case of cerebral gas embolism)은 스노클링으로 수중에 잠수하여 압축된 공기를 수중에서 레귤레이터로부터 들이마시는 경우에 발생 가능하다.

처치법으로는 감압증(DCS) 재감압의 경우와 비슷하며, 산소처치(HBO)는 신속하게 이루어 지도록 한다(Catron, 1991).

2) 기종(emphysema)

조직에서 발생한 가스로 인한 종격동기종과 피하기종은 흉골하부(substernal) 통증, 피하 열발음(subcutaneous crepitus)을 유발하면서 드물게는 순환장애를 일으키는 경우도 있다.

3) 기흉(pneumothorax)

기흉은 흉막내부(visceral pleura)가 공기압력과 폐의 파열로 발생한다. 이런 현상이 발생하면 통증과 손상을 입은 쪽의 호흡 장애와 심박수에서 변화를 보인다. 상태가 심할 경우 감압챔버에서 치료를 하기전에 흉부 튜브삽입(tube decompression)을 실시한다.

4) 기타 발생 요인

첫째 호흡을 중단한 채 상승(breath-holding ascent)할 경우로 패닉상태, 작호흡과 후두경련(laryngospasm)에 귀인한다.

둘째 국부 공기차단(local air trapping)될 경우로 천식(asthma), 기관지염(post-bronchitis), 폐의 표면에 수포발생(blebs), 폐강을 포함하는 공기 등에 귀인한다.

5) 대처법

단순한 방법(산소흡입과 기흉의 관찰), 공기색전증 치료를 위해 6기압까지 순간적인 압력증가와 심폐소생법까지 다양하다. 흉부 튜브 삽입(chest tube)은 소뇌 엠블리즘을 제외한 기흉을 처치하기 위한 일반적인 방법이다.

<표 1> 미 해군 처치법(유형 II의 감압증 산소처치법)

Depth (ft)	Time(min)	Breathing media	Total elapsed time(hr:min)
60	20	O <sub>2</sub>	0:20
60	5	air	0:25
60	20	O <sub>2</sub>	0:45
60	5	air	0:50
60	20	O <sub>2</sub>	1:10
60	5	air	1:15
60-30	30	O <sub>2</sub>	1:45
30	15	air	2:00
30	60	O <sub>2</sub>	3:00
30	15	air	3:15
30	60	O <sub>2</sub>	4:15
30 -0	30	O <sub>2</sub>	4:45

60피트에서 감압 I II 유형의 증후가 완전히 경감되지 않을 경우 사용(US Navy Diving Manual)

첫 번째 <표 1> 혹은 <표 2>을 사용할 것이냐를 결정한 후, 4시간이상 지연되었을 경우 <표 1>처치가 먼저 이루어져야 하고, 임상반응에 따라서 <표 2>를 진행하여야 한다. <표 2>의 처치는 신속한 압력상승으로 165피트(55m)의 상황을 이루게 하고 공기색전증이 심할 경우 적용한다. 이 압력에 적합한 챔버가 부재할 경우 3기압 용량의 챔버를 이용할 수 있다.

<표 1>에 반응이 없는 경우 100피트(33m)에서 산소/질소의 비율을 50:50으로 호흡하면서 30분 동안 처방하는 혼수처치 테이블을 이용한다(<http://www.scuba-doc.com/Dcspart1.html>).

<표 2> 미 해군 처치법(동맥가스 색전증의 초기 공기와 산소 처치법)

Depth (ft)	Time(min)	Breathing media	Total elapsed time(hr:min)
165	30	air	0:30
165-60	4	air	0:34
60	20	O <sub>2</sub>	0:54
60	5	air	0:59
60	20	O <sub>2</sub>	1:19
60	5	air	1:29
60	20	O <sub>2</sub>	1:44
60	5	air	1:49
30	15	air	3:49
30	60	O <sub>2</sub>	4:49
60-30	30	O <sub>2</sub>	2:19
30	15	air	2:34
30	60	O <sub>2</sub>	3:34
30-0	30	O <sub>2</sub>	5:19

165피트에서 동맥가스 엠블리즘이 완전히 경감되지 않을 경우 사용(US Navy Diving Manual).

### 3. 질소마취(nitrogen narcosis)

수중에서 흡입하게 되는 공기의 성분은 수분과 각종 불순물을 제거한 질소(N<sub>2</sub>)가 78.084%, 비활성 알곤 0.934%, 산소(O<sub>2</sub>) 20.946%, 이산화탄소(CO<sub>2</sub>) 0.033%, 기타 가스가 0.003%이지만 일반적으로 질소 80%, 산소 20%의 분압의 혼합가스로 간주한다.

이중 질소는 가장 많은 양을 포함하는 불활성 가스로서 생명유지에 필요 없는 무색 무취의 기체이다. 질소는 공기 속에 산소와 결합되어 체내에 흡입되어 전신을 순환한 후 다시 체외로 배출이 된다.

인체가 비정상적인 압력 상황에서 질소가 과다하게 체내에 축적이 되면 질소마취(nitrogen narcosis)현상을 유발하여 판단력과 방향감각의 손실로 무감각해지는 특징을 지닌다. 또한 갑자기 높은 압력에서 낮은 압력으로 인체를 노출하면 체내의 질소가 배출되지 못하고 혈관속에서 버블이 형성되어 감압증으로 유도된다. 즉 질소는 체내에서 에너지 대사과정에 참여하지 않는 기체로서 Dalton 법칙에 의해 질소마취를 유발시키며, 압력감소 과정 없이 깊은 수심에서 상승할 경우 Boyle법칙에 의해 감압증(decompression sickness)을 일으키는 원인이 된다(<http://www.mtsinai.org/pulmonary/books/scuba/contents.htm>).

일반적으로 수심 30m를 초과하면 압축 공기 속에 있는 질소에 의해 질소마취, 술에 취한 듯한 증세를 보이게 되어 작업수행능력은 급격히 감소하여 위험한 지경까지 가서 사고의 확률, 의식상실의 확률이 높다(Shilling 등, 1976).

질소마취는 부분압의 법칙(Dalton 법칙)에 따라 100FSW이하에서 잠수활동을 할 때 발생가능하며, 복잡한 추론 능력 33%와 작업 정교성 73%를 감소시킨다. 이러한 상태로 인해 운동기능과 판단력에서 손실을 가져오고, 이의 정도를 알코올에 비유하면 마티니 잔과 동일한 정도로서 매 50피트마다 마티니 1잔과 비

유할 수 있는 정도의 질소마취 영향을 받는다(<http://www.gullftel.com/~scubadoc/n2narc.html>).

질소마취의 발생은 Meyer-Overton 가설에 의하면 가스가 뇌 신경세포의 지질세포에 침투할 때 발생하며, 세포간에 신호 전달체계를 방해하고, 중추신경과정을 마비시키는 현상이다. 질소마취는 특정 수심에 도달한 후 수초내에 시작되어 그 수심을 벗어나면 동일한 시간에 그 현상이 사라진다.

생리적으로 질소는 정상적 상태에서 불활성가스지만 부분압이 증가하게 되면 마취효과를 지닌다. 이 마취효과의 정확한 원인은 잘 알려지지 않았지만 근본적인 원인은 가스와 신경세포의 상호작용에 의한 결과로 볼 수 있다. 이 현상은 수심 약 18m에서 발생가능성이 있고 약 33m부근에서 뚜렷이 나타나며, 그 징후는 초기의 저산소증(hypoxia)의 것과 비슷하다.

수심과 수중활동 시간 요인이 질소마취의 제 1요인이다. 18m 이하의 경우 약간의 질소마취가 발생할 가능성이 있고, 33m이하의 경우 확실히 그 증후를 보인다. 그 외의 여러 요인들이 수심의 영향과 결합되어 그 상태를 심각하게 하거나 더 위험하게 하는 요인이 될 수 있다(John Francis. <http://www.scubadiving.com/training/instruction/narced/>).

수심에 따른 신체의 반응정도는 10m-33m에서 숙련되지 않은 작업에서 중간정도 수행장애, 33m에서 추론 및 즉각적인 기억력 장애, 40m-55m에서 산술능력 장애 및 고정물체에 집착현상, 55m에서 졸림, 판단결함, 환각상태, 55m-75m에서 환각상태, 공포반응, 히스테리에 가까운 제어불능 웃음, 75m에서 극심한 지적활동 결함, 75m-100m에서 자극반응 지연, 집중력 감소, 정신적 혼돈, 청각력 증대, 100m에서 환각현상 등의 장애 현상을 보인다(NAUI, 1991).

만약 공기대신 헬륨과 산소의 혼합가스를 흡입하면 훨씬 더 심해까지 수중활동이 가능하다. 그러나 심해다이빙을 위해 혼합가스를 들이쉬게 될 때 일반 공기보다 더 명확한 이점이 있지만, 신속하게 압축을 받게 되면 높은 압력 신경 이상증세(High Pressure Nervous Syndrome, HPNS)로 졸음, 공포, 전율, 메스꺼움 등의 현상을 보이게 된다(NAUI, 1991).

Baddeley and Flemming(1967)은 해수와 압력챔버에서 실험결과 60msw의 수심에서 손기능의 정교함과 숫자 합하기 실험에서 수행속도에서 감소를 보였고, 이 감소는 매우 신속한 압력변화로 인해 발생하였다고 보고했다.

O'Reilly(1974)는 135msw까지 6명의 피험자에서 장기기억(long term memory)과 인지기능(cognitive function)에서 직접적으로 과제의 복잡성과 관련된 수행결함(performance deficit)을 보였다고 보고했다. 그 후 O'Reilly(1977)는 160msw에서 다이빙할 경우 증가된 반응시간과 산술능력에서 증가된 에러를 보였다고 보고했다. 그러나 시간의 경과에 따라 공간방향감각(spacial orientation)과 연상기억(associate memory)사이 그리고, 반응시간과 산술 능력 부족 사이에는 큰 차이가 없음을 보고했다.

질소마취 상태를 가중시키는 요인은 알코올, 약물, 고농도의 이산화탄소, 스트레스 및 불안, 현기증, 추위, 질병상태, 수면부족, 빠른 상승 등 여러 요인이 작용할 수 있지만 수심과 수중활동 시간이 가장 큰 영향을 미치며, 이는 특정 수심에서 압축된 공기를 흡입할 경우 과도한 량의 질소흡입과 부적절한 배출기전에 의해 운동수행능력에 영향을 미친다(<http://www.scubadiving.com/training/instruction/narced/>)는 보고가 있다.

따라서 수중에서 압축된 불활성 가스사용으로 운동수행능력에서 감소를 보이는 수심은 30m 이상의 수심의 경우에는 20m 수준보다 더욱 치명적인 위험성에 노출이 될 수 있고, 정교한 작업능력에서 감소를 보일 확률이 높기 때문에 수심 30m이상에서 안전 다이빙 및 작업을 수행할 때 가스분압을 조절한 나이트록스 다이빙(nitrox diving) 혹은 트리믹스 다이빙(trimix diving) 및 상승시 안전감압과 상승속도를 철저히 지켜야 할 위험한 수심인 것으로 보고하였다(류, 2002).

#### 4. 감압증(decompression sickness)

##### 1) 감압증 유형

신체 조직 속으로 확산되는 질소량은 다이빙 수심과 노출시간에 좌우된다. 상승시 신체는 절대압에서 갑작스런 변화를 겪게 되고, 조직 속에 용해된 불활성 가스는 초과된 질소가 호흡을 통해 배출되어야 할 충분한 시간이 없을 경우 용해된 상태에서 버블형태로 변하게 된다. 신체내부에서 이 버블은 정맥혈관, 골격근, 다른 기타 조직에서 형성될 수 있고, 감압증은 이 때 결과되는 임상적 상태를 말한다.

감압증의 용어는 1841년 처음 불려진 이후로 현재는 스포츠 다이버들로 인한 감압증에 더 심도 있는 연구를 해왔다. 감압증은 체내 순환과정에 질소의 버블링으로 발생되고, 이는 수심(depth)과 다이빙 시간(time), 수면으로 상승률(ascent rate)에 의해 좌우된다.

초기 감압증에 대해 Bends라 불렀던 증상을 유형 I, 유형 II, 유형 III(Bove와 Neumann이 DCS와 동맥가스 색전증을 결합하여 설명)으로 분류되어 연구되어졌다. 유형 I은 피부이상증상과 관절통증 혹은 단지 통증을 의미하고, 유형 II는 심폐시스템과 관련한 신경시스템(cardiopulmonary와 neurological system)의 심각한 증후를 포함하고, 유형 III은 동맥가스색전증(arterial gas embolism)과 신경학적 증후를 가진 감압증(DCS)을 합한 것을 의미한다.

통증 증후는 골격이 아닌 수족에서 산발적으로 나타나고, 어깨, 팔목, 손에서 나타날 때는 정확한 지점과 특징을 구분하기 힘들고, 압축된 공기에 의존하는 작업자는 하지에서 더 많은 통증을 보인다.

많은 가스를 포함한 혈관 내·외부에 발생하고, 지방질 골수에 저장되어 이압성 골괴저(dysbaric osteonecrosis)의 원인이 된다.

신경의 이상 증후는 스포츠 다이버에서 증가하고 있으며, 척추가 일반적인 발생 부위가 된다. 증후는 복부, 척추 하부, 하지의 통증, 느낌과 기능에서 약화와 손실을 들 수 있다. 소녀의 경우 발생 빈도가 생각보다 높다.

##### 2) 질소의 조직내 포화 및 제거

포화 잠수란 감압시간과 수면휴식시간을 최소화하면서 수중체류시간을 최대로 늘리기 위한 잠수방식을 말한다. 잠수를 하면 기체의 총압력과 기타 기체들의 부분압이 증가하게 되는데, 기체의 법칙에 따라서 액체 속에 용해되는 A기체의 분압은 그 액체와 접해있는 혼합기체(공기) 속의 A기체가 지니고 있는 부분압과 동일해질 때까지 증가하게 된다. 즉 기체들의 부분압이 양쪽에 동일해질 때 액체와 기체는 평형상태에 있게 되고, 동시에 액체는 포화상태가 되었다고 한다.

즉 혈액과 질소를 가지고 예를 들면 특정 수심에서 상승하는 동안 용해되어 있던 질소의 양이 인체와 접촉한 외부의 질소량보다 항상 많게 된다. 따라서 초과한 인체내의 질소는 빠져나가게 되는 데, 인체에 용해된 질소의 부분압이 주변압보다 너무 크게되면 질소는 버블로 변하여 감압증의 원인이 된다.

따라서 조직은 특정 수심에서 즉시 포화상태가 되지 않기 때문에 감압불필요 잠수의 한계나 감압해야 할 시간이 잠수시간에 따라 달라야 한다. 즉 조직이 질소에 의해 완전히 포화되면 잠수시간에 관계없이 질소가 방출되는 시간은 동일하다.

질소의 흡수과정은 여러 단계로 구성되는데, 이에 는 폐에서 혈액으로, 혈액에서 흘러가는 다양한 조직으로 불활성가스의 전달을 포함한다. 가스전달을 위한 추진력(gradient)은 폐와 혈액, 혈액과 조직사이의 가스의 부분압의 차이에 의해 이루어지며, 조직을 통해 흘러가는 혈액의 양은 전체의 조직에 비해 적지만, 일정한 시간동안 조직에 전달된 가스는 혈액 속으로 용해되어 옮겨진 것과 평형을 이루게 한다. 이 상태

를 포화(saturation)라 부른다. 뼈의 골수와 같은 조직은 포화상태에 도달하는데 많은 시간이 소요되지만, 뇌조직과 같은 경우는 매우 빨리 포화상태에 이르는 것처럼 신체의 조직에 따라서 포화되는 시간이 다르다는 이론이 『하프타임』 논리이다.

조직에서 가스 용해도의 감압모델을 수학적으로 개발하는 목적에서 하프타임의 이론을 도입할 수 있다. 즉 인체의 조직은 처음에는 빠른 속도로 질소를 흡수 및 방출하다가 점진적으로 속도가 감소하게 되는데, 이 과정에서 완전히 포화되는 질소의 양을 100이라 할 때 50%까지 질소가 용해되는데 소요되는 시간을 하프타임이라 한다. 만약 특정 조직에 있어서 하프타임이 5분일 경우 제 2하프타임시간에는 나머지 50%의 절반인 25%가 더 용해되어 포화상태의 75%수준에 달한다. 제 3하프타임에서는 나머지 25%의 반인 12.5%가 더 용해되어 포화상태의 87.5%, 제 4하프타임에서는 나머지의 절반인 6.25%, 제 5하프타임에서는 나머지 절반인 3.13%, 제 6하프타임에서는 나머지 절반의 1.56%가 더 용해되어 포화상태의 98.44% 수준에 달한다. 따라서 하프타임이 5분인 조직의 경우 포화시간은 『5 \* 6=30』분으로 산출할 수 있다. 인체의 조직에 따라서 5분에서 10분, 20분, 40분, 75분 등의 다양한 하프타임이 있다. 특정 수심에서 완전히 포화상태에 돌입했다면 그 이후 그 수심에서 시간이 더 경과되어도 질소가 더 이상 용해되어 흘러들어가지 않으므로 질소가 방출되는 시간은 증가하지 않는다.

질소의 제거의 과정은 흡수의 반대 순이다. 상승동안 그리고 수면에 올라온 후 조직은 확산작용(더 큰 농도의 지역에서 더 낮은 농도의 지역으로 분자의 움직임)에 의해 초과된 불활성가스를 혈액 속으로 흘러 들어가게 된다. 체내에서 확산하는 힘은 각 조직에서 불활성가스의 부분압과 혈액이 폐에서 가스와 평형을 이룬 혈관에서의 부분압과의 차이에 의한 것이다. 혈액으로 섭취된 불활성가스의 양은 제한되어 있다. 따라서 조직의 불활성가스 긴장은 점점 떨어지게 된다. 흡수과정에서와 같이 혈류의 비율, 부분압에서의 차이, 조직과 혈액에 용해된 불활성가스의 양이 제거된 비율을 결정한다(류 등, 1998).

제거되는 동안 혈액과 조직은 기포가 형성되지 않고, 초포화 용해상태(supersaturated solution)에 있는 가스를 흡수하게 된다. 초포화된 용해는 특정한 온도와 압력에 대해 평형상태에서 가능한 것보다 더 많은 가스를 흡수하는 용해이다. 혈액과 압력이 짧은 시간동안 초포화 되려는 능력 때문에, 다이버들은 최소한 다이빙의 기간 혹은 수심에 상관없이 상승할 수 있게 된다. 제거하려는 힘이 형성되어 불활성가스는 체내 조직으로부터 제거된다. 이 현상때문에 다이버들이 시간을 더 지연시킨 후에도 상승할 수 있게 해준다. 이 과정은 다이버가 안전하게 표면에 올라올 때까지 계속된다. 다이버의 신체는 어떤 조직에서 불활성가스를 포함하고 있지만, 감압한계내에 있고 이상의 압력감소가 일어나지 않는다면 안전하다.

### 3) 증상 및 처치

감압증은 복합질환으로 관절통증의 가장 흔한 곳으로 엘보, 어깨, 무릎, 히프관절을 들 수 있다. 피부는 반점으로 나타나고, 림파계에서 버블은 국부적인 림파손상을 일으킨다. 골격근, 피부, 림파 증상으로 한정된 감압증의 경우를 유형 I 감압증이라 한다.

더 심한 경우는 뇌, 척추 혹은 심폐계의 이상증세로서 신경학적 증상은 감각결핍(sensory deficit), 반신불수(hemiplegia), 마비(paraplegia), 감각-지각능력 감퇴(paresthesias), 말초신경 이상을 들 수 있다. 심폐계에 미치는 영향으로는 폐가스 색전증(pulmonary gas emboli) 혹은 심장근 경색증(myocardial infarction)을 포함하며, 신경학적 혹은 심폐증후를 가진 감압증을 유형 II 감압증이라 한다.

감압증은 60FSW 챔버 혹은 고압산소호흡과 관련된 수심에서 재감압으로 치료된다(15). 미국에서는 일반적으로 미해군 치료테이블의 기준에 따라 실시되고, 이런 테이블은 재감압이 신속하게 시작될 경우 매우 효과적이다(Butler 등, 1986).

미해군 치료 테이블에서 요구하는 요법의 목적은 불활성가스 제거율을 높이고, 버블크기를 감소시키는 데 유리하다.

#### 4) 예방

「얼마나 빠르게 상승하였나」 혹은 「반복다이빙 사이 수면휴식시간은 얼마나 되었나」를 토대로 미국 다이빙 테이블은 젊고 건강한 사람에서 감압의 영향을 연구한 후 정리하였고, 이를 토대로 교육단체인 PADI(Professional Association of Diving Instructors), DCIEM(Defense and Civil Institute of Environmental Medicine), NAUI(National Association of Underwater Instructor) 등은 더 보수적인 다이빙 스케줄을 위한 필요성을 충족시키기 위해 시도한 각 다른 다이빙 테이블을 개발하였다. 이는 부분적으로 무감압 다이빙을 위해 허용잠수시간을 감소시킴으로써 개발가능하였다.

감압테이블과 다이브 컴퓨터를 준수함으로써 감압증은 감소할 수 있지만 완전하지는 못한 것으로 나타났다.

즉 다이브 컴퓨터와 테이블은 다이빙을 하는 다이브 프로파일을 이해할 수 있도록 도울 수 있는 도구는 되지만, 스케줄에 집착한다고 해서 감압증으로부터 해방된다는 것은 아니다. 문제는 1톤 이상의 압축된 공기를 사용하게 될 경우 질소로 포화될 수 있고, 물기둥에서 상승할 때 가스를 적절히 배출하는 절차가 중요하다.

#### 5) 감압을 생략한 경우

미 해군의 수중에서 재감압 및 생략된 감압에 대한 절차는 저명 물리요법가 및 생리학자들에 의해 연구된 결론을 토대로 이루어졌다. 미 해군의 테이블 절차는 감압정지 1분으로 40', 30', 20', 10'의 수심에서 감압을 명시해주도록 되어있지만, 생략된 감압정지를 한 дай버들은 수면에 나와서 쇼크방지자세를 취하게 한 후 휴식과 100% 산소호흡, 음료섭취 등으로 감압병의 증후, 증상을 확인해야 한다. 만약 감압증세를 보이면 고압시설(hyperbaric facility)로 운반되어야 한다.

조심해야 할 사항은 다시 동일한 수심의 물속에서 재감압을 실시하는 시도는 잘못된 발상이다. 즉 짧은 시간으로는 형성된 버블을 제거할 수 없을 뿐 아니라 물속에서 감압조치로 인해 더 악화된 결과를 초래할 수 있기 때문에, 순수 산소호흡은 물속에서 여러 절차보다 더 유익할 수 있다. 감압을 생략하였을 경우 어떠한 증후가 없다 할지라도 최소한 24시간 동안 다이빙을 금해야 한다.

#### 6) 감압증 예방을 위한 도구

##### (1) 다이빙 테이블(Dive tables)

수많은 다이빙 표가 존재하지만 오늘날 대부분이 미 해군성 다이빙 테이블(U.S. Navy Diving Table)을 이용하거나 변형시킨 레크리에이션용 NAUI, PEDI, BASAC 등이 있으며, 미 해군성 감압테이블은 모든 반복 다이빙의 종료시 수심 15피트에서 3분 안전정지가 이루어져야 하고, 이 때 안전감압 정지시간은 잠수시간이나 수면휴식시간으로 계산하지 않는 것이 특징이다.

다이빙 테이블은 감압 및 재감압증을 피하고 안전하고 즐거운 다이빙을 위해 오픈 워터 코스에서 숙지해야 할 내용이다. 여기에 내포된 물리학과 생리학의 복합성으로 인해 정확한 답을 내기가 어렵지만 지난 80년 동안 연구결과 세계전역에서 다양한 이론과 테이블이 개발되고, 이들 각각은 다양하고 특수한 환경에 적용시키고 있다. 따라서 감압 테이블을 이용하여 충분히 숙지해야 할 사항은 1회 혹은 반복 다이빙 계획시 반복 문자군 명사와 반복다이빙시 최대다이빙 시간(Adjusted Maximum Dive Time, AMDT) 제시.

반복 다이빙시 최소 수면휴식 시간(min. surface interval time) 제시. 반복 다이빙시 허용가능한 최대수심 제시가 가능해야 한다.

## (2) 감압을 위한 각종 게이지

감압에 대해 정보를 줄 수 있는 장치는 많지만 얼마나 깊이 들어가서 얼마나 오래동안 그 수심에서 머무는가 하는 것은 자신이 결정할 문제이다. 가장 중요한 것은 감압병을 피하려고 시도할 때이다. 감압에 가장 일반적으로 사용되는 다이빙 테이블 이외 모세형 수심게이지(capillary depth gauge), 다이어프램 수심게이지(diaphragm depth gauge), 오일형 수심게이지(oil-filled depth gauge), 아나로그 시계, 디지털 시계, 아나로그 잠수시계, 디지털 잠수시계, 다이빙 컴퓨터 등을 들 수 있다.

이러한 보조 기기들 중 가장 신빙성이 있는 것은 다이빙 컴퓨터를 들 수 있다. 할데인은 감압이론의 시초로 감압에 대해 거의 80년 동안 이루어지고 있다. 수면에서 공기를 공급하는 다이빙에 비해 스쿠버 다이빙의 역사는 약 45년 정도 된다. 출현 10년도 채 되지 않은 시점에서 다이빙 컴퓨터의 출현으로 모든 다이빙에서 안전하고 즐겁게 할 수 있는 계기를 마련한 셈이다.

미 해군 테이블은 일반 감압이론을 단순화시킨 것으로 읽고 사용하기에 편리하게 되어있다. 이 간편함에도 불구하고 다이빙 테이블의 계산은 종종 혼란을 야기하기도 하며, 복잡성을 지니지만 컴퓨터에서 감압 모델을 가동시키므로서 모든 다이빙 유형을 가능하게 하였다.

또한 다양한 수심다이빙(multi-level diving)시 미 해군 테이블은 한 곳의 수심에서 소요하는 다이빙의 개념을 토대로 고안되었지만 실제 레크리에이션 다이빙은 일정한 수심을 유지하는 경우는 거의 희박하다. 따라서 다양한 수심에서 다이빙을 할 때 실제 보다 더 많은 질소를 흡수하게 된다. 다양한 수심에서 다이빙을 할 때 『최대수심에서 최대시간』의 원칙을 지키거나 수많은 조직에 의한 정확한 질소 흡수, 정확한 수심을 계속적으로 산출해주는 다이빙 컴퓨터를 사용하는 것이 좋다. 일반적으로 다이빙 컴퓨터의 기능은 모델에 따라서 약간의 차이는 있지만 무감압 한계, 현재수심, 잔류질소량, 최대수심, 잠수시간, 상승속도, 감압정지수심과 시간 등 상세한 정보를 제공해준다(NAUI, 1991).

## 7) 감압증 치료

### (1) 재압챔버(recompression chambers)

감압증이나 에어엠프블리즘과 같은 심각한 다이빙 상해에 대한 처치를 재압이라고하고, 이는 재압챔버에서 이루어진다. 챔버에서 치료를 받게 되는 경우는 일반적으로 세 가지 집단으로 분류된다.

첫 번째 관심 없이 계속적으로 다이빙을 즐기는 집단으로서 감압이나 에어엠프블리즘으로 고통을 받고 있는 경우, 둘째 한계를 벗어난 다이버(over-the limit)로서 자신의 지식과 훈련의 한계를 초월하여 다이빙을 하는 경우로서 적절한 가이드 없이 심해잠수나 반복다이빙을 하는 초심자의 경우와, 세 번째 부적절하게 교육을 받은 다이빙 집단으로 상승동안 호흡을 정지한 채로 올라오거나, 시간과 수심을 잘 조정하지 못하여 감압증을 피하지 못하는 경우를 들 수 있다.

감압챔버의 특징은 압력용기로서 주변환경압과 다른 압력상태를 유지하는 일정량의 가스를 유지하고 있다. 챔버는 반원통형(실린더형)이지만 컴머셜 다이빙에서 사용하는 원통형이 있으며, 챔버 용량은 지름의 크기를 측정하는 데, 54인치형, 26인치형 및 96인치형 등이 있다.

압력은 가용압력(psi) 혹은 절대기압(ATA)으로 나타내며 에어엠프블리즘이나 감압증을 즉시 치료하기 위해서는 수심 165피트의 높은 기압인 6ATA 혹은 90psi에 환자를 압축시킨다.

챔버는 여러 개의 부분(copartment)과 락(lock)으로 구성되는 데 락은 출입문과 닫을 때 압력이 밀폐되는 출입문으로 구성되며 각 부분은 환경압과 서로 독립적으로 압축될 수 있는 공간이다. 한국의 경우 재압챔버 시설이 되어 있는 곳은 서울 강남병원 고압산소치료실(02-554-9011), 부산 동아대학교 부속병원 잠수클리닉(240-2275), 진해 해군해양의학적성훈련원(0553-49-5896), 여수제일클리닉(0662-83-2011), 제주대학교병원 잠수클리닉센터(064-750-1234)를 들 수 있다.

#### (2) 감압을 생략하였을 경우 대처법

미 해군의 수중에서 재감압 및 생략된 감압에 대한 절차는 저명 물리요법가 및 생리학자들에 의해 연구된 결론을 토대로 이루어졌다. 미 해군의 절차는 감압정지 1분으로 40', 30', 20', 110'의 수심에서 감압을 명시해주도록 되어 있다. 이 복잡한 절차를 더 쉬운방법으로 대체했다. 즉 생략된 감압정지를 한 다이버들은 물 속에서 나와서 휴식과 100% 산소호흡, 음료섭취 등으로 감압병의 증후, 증상을 확인해야 한다. 만약 감압증세를 보이면 고압시설(hyperbaric facility)로 운반되어야 한다.

새로운 절차에 의한 합리적인 방법은 수면에 올라오자마자 마자 인체 내에서 버블이 형성되고, 물 속에서 재감압은 이미 형성된 버블을 제거할 수 없을 뿐 아니라 물 속에서 감압조치로 인해 더 악화된 결과를 초래할 수 있기 때문에, 순수 산소호흡은 물 속에서 여러 절차보다 더 유익할 수 있다. 감압을 생략하였을 경우 어떠한 증후가 없다 할지라도 최소한 4시간 동안 다이빙을 금해야 한다. 또한 다이빙 후 비행함으로써 해수면의 압력보다 환경압을 감소시키는 것은 감압증 증세를 유발할 수 있다(류 등, 1998).

### III. 요약 및 제언

잠수활동동안 수중의 압력의 변화로 인해 신체에 이상 증세를 보이는 질환으로서, 동맥가스색전증(AGE), 질소마취, 감압증(DCS) 등을 들 수 있는데, 이들은 모두 심해잠수 및 상승속도를 너무 빨리하게 될 때 체액과 조직에서 용해된 가스로부터 초래한다. 즉 감소하는 압력이 체액에서 가스의 용해도를 더 낮게 하기 때문에 발생한다. 또한 폐에서 가스의 확장은 폐과팽창 증후(pulmonary overinflation syndrome)로 알려진 폐포파열을 초래하기도 하며, 이는 결국 동맥가스 색전증(AGE)을 초래한다. AGE 및 DCS와 나타나는 모든 것은 감압증으로 요약이 될 수 있으며, 관절통증은 DCS에서 즉 엘보, 어깨, 히프, 무릎관절에 심하다. 버블에 의한 혈관의 차단으로 조직의 경색과 국소 빈혈(ischemia) 및 염증변화(inflammatory change)는 조직속으로 출혈, 부종(edema)으로 발전시켜 순환을 악화시킨다.

감압증은 챔버 혹은 고압산소 호흡과 관련된 더 깊은 수심 상황에서 재감압 치료를 받아야 하고, 무엇보다 예방을 위한 사전 잠수계획이 필요하다. 즉 다이빙의 사전 계획에 따른 모든 프로파일을 작성하고, 안전절차를 준수하도록 한다.

### 참 고 문 헌

- 류재청(1997). 스쿠버 활동시 감압증 이론과 관련한 주요인의 원인과 예방법에 관한 고찰과 제 이론. 제주대학교 체육과학연구 제 3집.  
류재청·윤상택(1998). 「스킨·스쿠버Ⅱ」, 온누리.

- 류재청(2002). 잠수활동에서 활동수심과 시간에 따른 잠수증(질소마취)에 미치는 요인의 정량화와 예방법. 한국체육학회지 제 41권 제 1호, 575-591.
- Behnke. AR(1931). Analysis of accident occurring in training with the submarine "lung". U.S. Naval Medical Bull. 30:177-184.
- Butler FK, Pinto C(1986). Progressive Ulnar Palsy as a late complication of decompression sickness. Annals Emerg Med 15: 738-741.
- Campell. E. S.(1997). Decompression illness in sports divers : Part I. Orthopaedics and sports medicine of Journal.
- Campell. E. S.(1997). Decompression illness in sports divers : Part II. Orthopaedics and sports medicine of Journal.
- Catron PW, Dutka AJ, Biondi DM(1991). Cerebral air embolism treated by pressure and hyperbaricoxygen. Neurology. 41: 314-315.
- Meyer. H. H.(1899). Theories der alkoholnarkose. Arch. Exp. path. Pharmak. 42.109. Cited in Physiology and Medicine of Diving 4ed.170-193. Ed. Peter B. Bennett and David H. Elliott. Saunder.
- Moxon. W.(1881). Croonian lectures on the influences of the circulation on the nervous system. Br. Med. J. 1. 491-497. 583-585. Cited in Physiology and Medicine of Diving 4ed. 170-193. Ed Peter B. Bennett and David H. Elliott. Saunder.
- NAUI(1991). Advanced Diving(Technology and Techniques). National Association of underwater Instructors. PP 131-155.
- NAUI(1991). The NAUI Textbook II. National Association of underwater Instructors. PP 125-33.
- O'Reilly(1974). Effect of nitrogen narcosis on cortical and subcortical evoked response in cat. Aviat. Spacw Environment med. 46. 259-263.
- Overton. E.(1901). Studien uber die Narkose. Jena: Fischer. Cited in physiology and Medicine of Diving 4ed. 170-193. Ed Peter B. Bennett and David Elliott Saunder.
- Shilling. C. W. & Willgrube. W. W.(1937). Quantitative study of mental and neuromuscular reactions as influenced by increased air pressure. US Nav. Med. Bull. 35, 373-380.

※ Web Reference

<http://www.mtsinai.org/pulmonary/books/scuba/contents.htm>  
<http://www.scubadiving.com/training/instruction/narced/>  
<http://www.gullftel.com/~scubadoc/n2narc.html>

접 수 일 : 2002. 11. 11  
게재확정일 : 2002. 11. 20