

산업 잠수 기술의 발달

(Developments in Commercial Diving Techniques)
 - 혼합기체를 중심으로 -

김 도현, 강 신영
 한국해양대학교 해양공학과

1. 서 언

인류는 약 육천 년 이전부터 바다를 탐험하여 왔으나, 수중개발에 눈뜨기 시작하여 수중기술 (Underwater Technology)을 실용화한 것은 반세기도 채 되지 않는다. 특히 1970년대 중반부터 급속한 발전 및 성장을 가져왔으며, 이는 해저유전 개발과 밀접한 관계가 있다 (Fig. 1). 그 이전의 잠수 활동 (Diving Activity)은 해군 작업 (Naval Services)을 중심으로 한 장비, 기술 및 운용 (Equipment, Techniques and Procedures) 등에 대한 개발이 주를 이루었으며, 민간 활동 (Commercial Activity)은 한두 건의 극적인 해난구조작업을 제외하면 대개가 항구나 독크에서의 간단한 작업에 국한되었다.

1970년대의 급속한 발전과 성장에 이론적으로 밑거름이 된 것은 포화개념 (Saturation Concept)이라 할 수 있다. 이 개념은 1957년 미 해군의 Bond 대령에 의해 정리되었는데 (Bond, 1964), 신체조직의 노출시간 (Exposure Time)이 충분히 길 경우 신체조직은 결국 불활성 기체로 포화된다는 것이다. Bond 와 그의 동료들은 동물에 이은 인체에 대한 실험으로 잠수사가 일단 포화되면 그 때부터의 해저 체류시간에 대한 추가적인 감압시간이 필요없다는 것을 증명하였다. 그 이후 일련의 여러 해저 거주 실험 (Subsea Habitat Project) (Kenny, 1973; Haux, 1982)을 통한 포화잠수 및 기술개발은 해양의 석유와 천연가스 탐사, 생산에 효율적으로 일익을 담당하게 되었다.

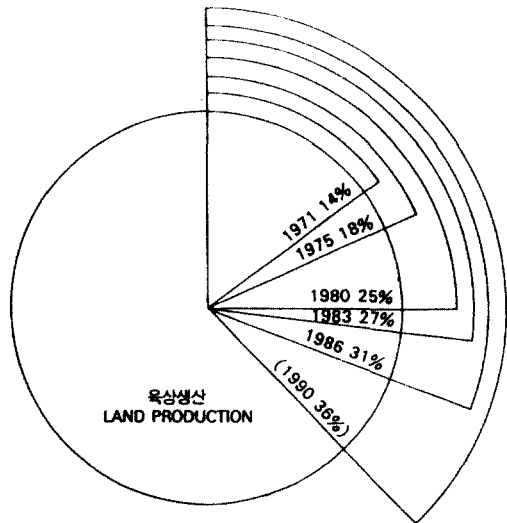


Fig. 1 Offshore Free World Petroleum Production as a Percentage of Total. (from Lawrie, 1985)

이같이 해저유전 개발은 잠수기술의 급속한 발전을 가져오게 되었고, 과거 해군 작업 위주에서 탈피하여 민간이 잠수산업을 주도해 나가는 계기가 되었다. 본고에서는 이러한 잠수기술을 개발하는데 해결해야 할 제반 어려움들에 대한 관심을 높이기 위해 잠수산업의 발달과정과 배경, 현재 산업잠수계에서 사용되고 있거나 개발중인 혼합기체들에 대한 이론적 배경, 종류, 운용방법 등에 대해 기술하였다.

2. 잠수산업의 발달 과정

이미 1947년에 멕시코만에서 해저 유전이 성공적으로 개발된 바 있으나 실질적인 잠수산업계의 활동은 1960년대 초부터 시작되었다고 보고 있다 (Lawrie, 1985). 그 이전에는 모험심으로 가득 찬 몇몇 개척자들에 의해 잠수작업이 필요에 따라 소규모로 행해지곤 하였는데, 미국에서는 해양 유전업계 (Offshore Oil Industry)의 요구에 의하여 시작된 반면, 유럽은 과학이나 군사적 목적 또는 연안 건설업에서부터 출발하였다.

1962년경 잠수산업계에서는 1차적으로 업체의 분류 현상이 나타났는데, 이는 혼합기체를 사용한 깊은 수심에서의 잠수가 가능하게 되어 이 기술과 장비를 갖추지 못한 업체는 정리되거나 단지 공기잠수만 가능한 영세적인 지방 하청업자로 남게 되었다. 1966년에는 포화잠수 기술 (Saturation Diving Techniques)의 실용화로 (Lord et al., 1966) 더욱 깊은 수심에서 장시간에 걸친 잠수가 가능하게 되어, 해저유전의 해양구조물 설치 작업에 참여하기 위해서는 값비싼 심해 잠수장비 (Deep Diving System)가 필수적인 투자 대상이 되었다.

그 이후 약 5년에 걸쳐 잠수업계는 자본투자, 즉 고가의 장비 보유능력에 따라 10내지 12개의 대형업체로 압축되었으며, 1960년대 말부터는 활동영역을 자국뿐만이 아닌 다른 국가들로 넓혀 나갔다. 이런 잠수업계의 국제화 및 다국적기업화에 가속을 가한 계기는 북해 유전개발의 효시가 된 Ekofisk 해저유전의 발견이었다. 이는 수중업계 (Subsea Industry)에 큰 시장성을 안겨주었으며, 유럽업계의 큰 변화를 가져오게 하였다. 이같은 업계의 변화와 발전은 북해에서만으로 국한되지 않고, 주요 석유회사들 (Major Oil Companies)의 확장 정책과 더불어 지중해, 아프리카, 아시아 및 남미 등지로 넓혀 나갔다.

1965년부터 약 10년간 잠수업계의 이윤폭은 컸으며, 이는 연구 개발 및 장비확보에 재투자되어 잠수산업은 급속한 발전을 이루었다. 이 기간중 각 업체들은 잠수장비를 자체적으로 개발하여 생산까지 하였는데, 이는 1960년대 중반까지만 하더라도 심해 잠수장비 (Bell 이나 이와 유사한 장비 등)를 전문적으로 생산 공급하는 업체가 없었기 때문이다. 1975년에 이르러서야 대여섯 개의 잠수장비 제작업체가 생겨났다.

한편 1970년대 초까지만 하더라도 수중업계의 주역할은 시추작업의 보조활동이었으나, 1972년부터 북해, 멕시코만을 위시하여 각 해상유전지대에서 많은 생산시설이 건설되어 수중 업계는 석유 생산 시설의 해양구조물 공사 부문으로 활동 영역을 넓혔다. 그러나 1977년 수중업계는 첫 불황을 맞이하여, 1978년부터 3년간 업계는 공급과잉 현상을 맞이하여 도산하는 업체도 생겨났다. 이후 1981년에 이르러 서서히 회복되기 시작하여, 1983년 중후반기부터 1984년까지 해양 유전업계 (Offshore Industry)와 수중

업계 모두 서서히 정상궤도로 돌아왔다.

이 당시 노르웨이에서 Troll Field의 발견(1979년) 및 Statpipe의 파이프라인 설치 계획(1981년) 등으로 200 msw (meter sea water) 이상의 수심에 까지 잠수가 필요하게 되었고, 지금까지 이에 따른 잠수기술의 많은 개발이 이루어져 왔다 (Rosengren, 1988). 그러나, 아직도 북해에서는 200 msw 보다 깊은 곳의 잠수는 평범한 작업으로 간주되지 않고 있으며, 특히 노르웨이 석유기구 (Norwegian Petroleum Directorate)에서는 철저한 사전준비와 적절한 절차에 따르도록 하고 있다 (Hollobone, 1988). 그리고 비록 1975년 Labrador에서 326 msw 잠수를 성공적으로 하였지만, 200~300 msw의 심해잠수 (Deep Diving)가 일반적으로 행하여진 것은 1983년 이후이다. 앞으로 브라질 대륙붕 끝단, 노르웨이 해구 등지의 개발 계획에서 300 msw 잠수의 중요성이 점점 강조될 것이다.

3. 혼합기체 잠수

3.1 원리

압축공기를 사용함으로써 어느 수심이상에서 야기되는 문제점인 질소마취 (Nitrogen Narcosis)나 장시간의 감압으로 인한 위험초래 및 비경계성 등은 혼합기체의 사용으로 해결될 수 있다. 혼합기체란 넓은 의미로는 공기가 아닌 여타의 호흡기체를 일컫지만, 일반적으로는 공기중의 질소 전부 혹은 일부 대신에 가볍고 마취력이 약한 다른 불활성기체를 산소와 혼합하여 만든 기체를 말한다.

혼합기체 잠수에 있어서 흡입하는 기체의 산소분압은 절대적으로 중요한 요소이다. 즉 잠수사의 생명작용과 육체적 활동 요구량을 충족시킬 수 있는 충분한 산소를 공급하되, 중추신경계 산소중독 (Central Nervous System Oxygen Toxicity) 을 유발치 않는 한계인 1.6 bar 보다 낮아야 되며, 산소결핍증 (Hypoxia)이 나타나기 시작하는 0.5 bar 보다 높아야 한다 (Fig. 2).

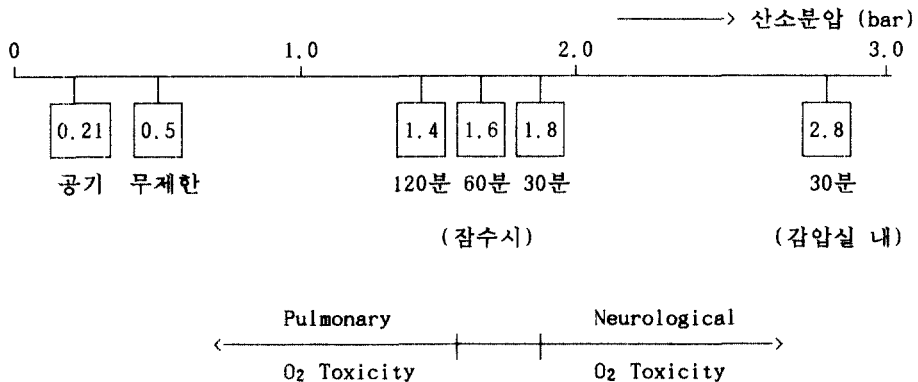


Fig. 2 Limits of Oxygen Toxicity (from GKSS, 1991)

잠수사에게 산소를 공급하는 매체의 역할은 비정상 생리반응을 가장 적게 유발시키는 불활성기체 (Inert Gas)로 선택한다. 불활성기체중의 하나인 질소는 약 30미터 (질소 분압 = 3.4 기압)부터 마취 증세를 유발시키기 시작하여 약 60 msw (200 fsw: feet sea water)를 지나면서부터는 많은 잠수사들에게 육상과는 다른 몸놀림, 환각이나 마취 증세를 가져오며 이를 질소마취 (Nitrogen Narcosis)라고 한다. 반면에 헬륨은 약 366 msw (1200 fsw) 까지도 이 증세가 나타나지 않는다 (Bennett, 1982a).

헬륨 (He), 네온 (Ne), 수소 (H₂), 질소 (N₂), 아르곤 (Ar), 크립톤 (Kr), 크세논 (Xe) 등의 불활성기체의 마취성은 그 기체의 분자량, 흡수계수 (absorption coefficient), 열역학적 활동성 (thermodynamic activity), Van der Waal 상수 등 여러 물리적 상수와 관련이 있는 듯하며, 이들과의 관련성에 대해 계속 연구가 되고 있다. 지금까지 밝혀진 바에 의하면 마취성은 지질 (lipid)에 대한 용해도와 가장 관련이 있고 polarizability, molar volume 등과도 관련이 있다. Table 1 은 기체의 분자량, 지질 (lipid)에 대한 용해도, 질소를 기준으로 한 상대적 마취성 (Relative Narcotic Potency) 을 보여주고 있다. 상대적 마취성을 비교하여 볼 때, 마취성이 가장 약한 기체는 헬륨으로서, 질소보다 약 4.26배, 수소는 약 1.83배 약하다. 혼합기체 잠수에서 질소대신 헬륨이나 수소가 사용되는 것은 이같은 이유에서이다.

TABLE 1. Correlation of Narcotic Potency of the Inert Gases, Oxygen, and Carbon Dioxide with Lipid Solubility. (from Bennett, 1982a)

Gas	Molecular Weight	Solubility in Lipid	Relative Narcotic Potency
He	4.0	0.015	4.26
Ne	20.0	0.019	3.58
H ₂	2.0	0.036	1.83
N ₂	28.0	0.067	1.00
Ar	40.0	0.140	0.43
Kr	83.7	0.430	0.14
Xe	131.3	1.70	0.039
O ₂	32.0	0.11	-
CO ₂	44.0	1.34	-

기술적으로 볼 때, 헬륨/산소나 다른 합성 혼합기체들 (Synthetic Mix Gases)을, 기존의 공기호흡식 장비에 사용하는 것은 가능하지만, 개방식 호흡장치로 인한 기체 손실을 고려한다면 경제적으로 불합리하다. 따라서 호흡한 혼합기체는 재순환되어야 하므로 대부분 혼합기체 계통의 생명유지 시스템 (Life-Support Systems)은 공기를 사용하는 시스템보다 대단히 복잡하다. 잠수사가 혼합기체를 들이던 다음 내쉬는 기체의 산소농도는 들이실 때의 기체보다 적으며, 산소 소모량은 잠수사의 신진대사율에 따라 좌우된다. 헬륨은 단지 매체 역할만 할 뿐이므로 양이나 질에서 거의 변화가 없다.

내린 혼합기체를 다시 사용하기 위하여는 이산화탄소를 제거하여야만 한다. 재 사용 될 혼합기체는 잠수사가 소모한 산소량 만큼 재 보충되고 다시 정화되어 잠수사에게 공급된다.

3.2 혼합기체의 종류

1960년대 초부터는 압축공기를 사용하는 잠수의 안전 한계수심보다 깊은 곳에서의 작업에 대한 필요성이 점차 증가됨에 따라 혼합기체를 사용하는 새로운 잠수기술이 업계에서 급속히 개발되었다. 잠수기술에 있어서 인공적으로 합성된 혼합기체 (Synthetically Mixed Gas)의 사용은 전혀 새로운 착상이 아니다. 실제로 1920년 이후부터 특수한 작업에 헬륨과 산소, 수소와 산소, 그리고 특수 혼합비율의 산소와 질소등 여러 혼합기체들이 제시되어 시험을 거쳐 사용되어져 왔다 (U.S. Navy Diving manual Vol. 2, 1991). 현재도 수심이 깊어짐에 따른 여러 문제점들 (Fig.3)을 극복 키 위한 새로운 기술의 연구 개발이 지속적으로 이루어지고 있다.

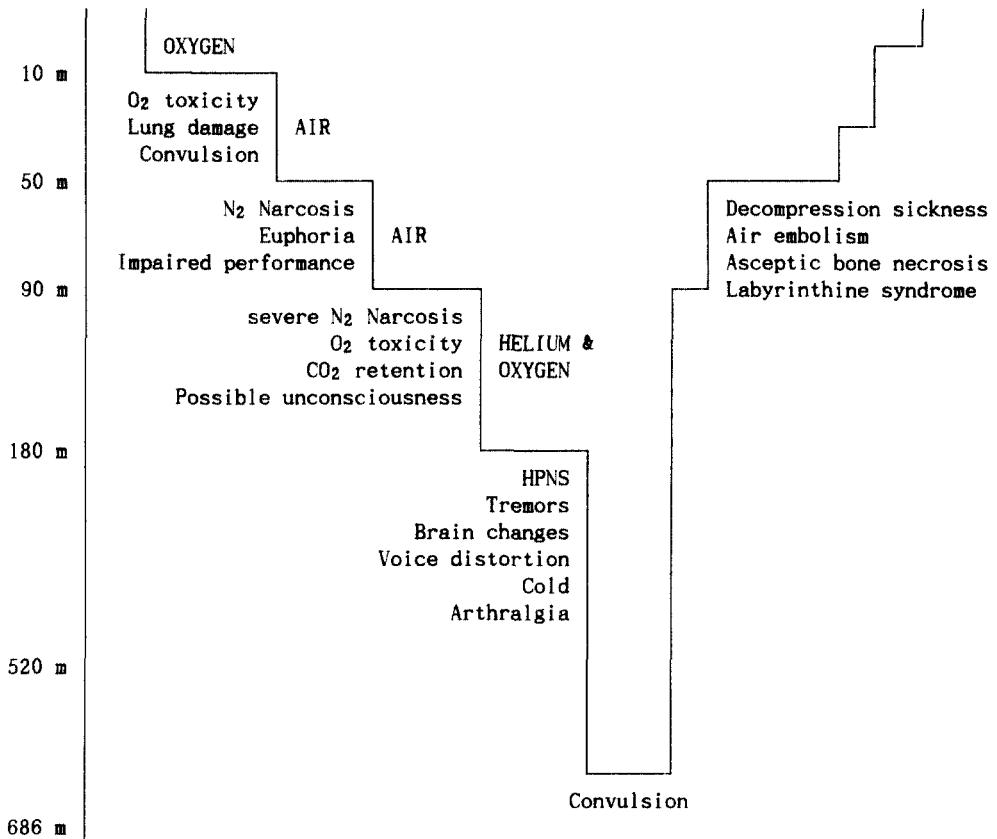


Fig. 3 Physiological and Medical Problems of Diving (from Bennett, 1990)

1) 나이트록스 (Nitrox)

이는 질소와 산소를 적정비로 합성한 혼합기체를 일컫는다. 일반공기의 산소 구성비 21 % 보다 혼합기체의 산소비율이 낮을 경우 꽤 깊은 수심 (약 40 msw 이상)에서 발생 가능한 산소 중독증 (Oxygen Toxity)을 예방 할 수 있으며, 이같은 혼합기체는 대기압보다 높은 압력에 여러날 노출되는 포화잠수 (Shallow Habitat Saturation)에 사용되어질 수 있다. 비록 얕은 곳 (약 9-43 msw)일지라도, 해저 거주시 포화상태로 장시간의 노출은, 산소분압이 높을 경우 폐중독(Pulmonary Toxity)을 유발시킬 수 있다. 이 같은 산소중독을 막기위하여 산소분압은 0.2-0.35 bar 로 낮춰야 한다. 일반적으로 포화잠수에서의 나이트록스 혼합은 포화수심에서의 산소분압이 0.3-0.35 bar 가 되도록 한다 (Table 2).

Table 2 Characteristics of Nitrox Mixtures Used for Habitat Saturation Diving (from Bove and Wells, 1990)

Sat. Depth (fws)	Sat. Press. (bar abs.)	O ₂ -Air (%)	pO ₂ -Air (bar abs.)	O ₂ -Nitrox (%)	pO ₂ -Nitrox (bar abs.)
40	2.21	21	0.46	13.6	0.3
60	2.82	21	0.59	10.6	0.3
80	3.42	21	0.72	8.8	0.3
100	4.03	21	0.85	7.4	0.3
120	4.64	21	0.97	6.5	0.3
140	5.24	21	1.10	5.7	0.3

근자에 이르러서는 상기 나이트록스와 반대로 산소의 구성비가 21 % 를 초과하는 EAN (Enriched Air Nitrox)에 대한 관심이 높아졌다. EAN의 사용은 질소마취 감소, 수중활동시간 증가, 잔류질소량 감소 등의 장점이 있어, 과학자들과 고급 스포츠 다이버들 사이에 많이 쓰여져 왔다. 그러나 산소중독의 위험이 존재하므로 주로 12-45 msw 사이의 비교적 얕은 수심에서만 사용이 가능하다. 최근 미국에서는 나이트록스의 대중화에 관한 여러 가지 문제점과 가능성을 검토중에 있다 (Graver, 1992).

2) 헬리옥스 (Heliox: 헬륨+산소)

1915년 호놀룰루의 93 msw 해저에 침몰한 미해군 잠수함 F-4 (USS F-4) 인양 작업에서 심한 질소마취 증세로 작업이 효율적으로 이루어지지 못하고, 장시간의 감압으로 인한 해저체류시간 (Bottom Time) 제한 (약 10분) 등으로 공기 잠수의 한계를 인식케 되었다. 당시 미해군 잠수사들의 최대 잠수기록은 83.5 msw (274 ft)였다. 그후 2-3년 뒤 Elihu Thomson 은 헬륨이 질소를 대신할 수 있다는 이론을 세웠고, 1919년에 미

자원국 (U.S. Bureau of Mines; 당시 헬륨의 판매권을 갖고 있었음)에 연구개발을 제시하였다. 1924년에는 자원국과 해군 당국이 함께 헬리옥스 혼합기체 실험을 지원하였으며, 1927년 미해군은 독자적으로 실험잠수대 (EDU : Experimental Diving Unit)로 사업을 이전하여 연구를 계속하고 있다. 1930년대는 주로 Behnke and Willmon (1941)에 의해 연구가 되었는데, 이들의 연구는 미해군 잠수함 Squalus 인양 작업시 실질적으로 시험케 되었다 (1939). 이 작업의 완료로 헬리옥스는 일반적인 심해잠수 (45.7 msw; 150 fsw 보다 깊은 곳)의 호흡 혼합기체가 되었다.

한편 민간에서는 1937년 Max Gene Nohl 이라는 기술자가 미시간호에서 128 m 까지 잠수하였고, 1946년 민간 잠수사 Jack Browne 은 168 m (540 ft) 모의잠수 (Simulated helium-oxygen dive)를 하였다. 그 이후 1948년 영국해군 잠수사가 실제 바다에서 168 msw 잠수 기록을 세웠다 (Kindwall, 1990).

이 같은 초창기 실험들을 바탕으로 약 610 msw (2000 fsw)까지의 모의잠수도 실시된 바 있고, 이에 따른 광범위한 연구가 계속되고 있다. 일반적으로 업계에서는 약 50 msw 이상의 수심일 경우 헬리옥스를 사용한다. 헬리옥스는 현재 가장 널리 쓰이는 혼합기체로서 약 300 msw 까지의 잠수에 사용한다. 헬륨의 비마취성은 지질과 물 분리계수 (Lipid-Water Partition Coefficients)와 낮은 지질용해도 (Lipid Solubility)에 기인한다는 설이 가장 설득력이 있다. 그러나 이러한 비마취성때문에 180 msw를 넘게되면 고압신경증후군 (HPNS : High Pressure Nervous Syndrom) (Bennett, 1982b)이라는 새로운 증세가 나타나기 시작한다.

3) 트리믹스 (Trimix: 헬륨+산소+질소)

1965년 183 m (600 ft) 까지 빠르게 가압하는 모의잠수(Simulated Dives) 과정에서 질소마취와는 달리, 손, 팔 심지어 전신이 떨리면서, 어지럽고 메스꺼우며 간혹 구토 증까지 동반되는 증세가 나타났는데, 이 증세는 HPNS (고압신경증후군)로 불리게 되었다. 심해 잠수사의 이같은 HPNS 를 방지하기 위하여 미국을 비롯 영국, 독일, 프랑스, 노르웨이, 일본 등지에서 1000 ft 이상의 실험을 50회이상 행하였다. 그 후 Bennett et al. (1967)의 불활성기체들의 표면장력 변화에 관한 연구 결과와 올챙이 (Johnson and Flagger, 1950)와 생쥐 (Lever et al., 1971) 를 사용한 실험을 바탕으로 대두된 압력역전이론 (Pressure Reversal of Narcosis Theory) 에 근거하여 트리믹스라 불리는 혼합기체 (헬리옥스에 약간의 질소를 섞음)가 개발되었다.

이 기체는 1974년 Duke Medical Center 의 F.G. Hall Laboratory 에서 처음으로 인간에게 사용하였다. 18 % 의 질소를 첨가하여 HPNS 에 대해서는 확실한 효과를 보았지만, 일부 잠수사에게서 질소마취 현상이 발견되어 질소함유량을 10 % 까지 낮추었다. 한편 프랑스와 노르웨이에서는 이 보다 더 소량의 질소를 사용하여 질소마취와 HPNS 에 대한 시험을 하였다. 그 후 Duke 대학에서 1979년부터 1982년에 걸친 일련의 실험으로 질소 함유량을 일반적으로 10~5 % 로 사용하게 되었으며, 이를 사용하여 686 m 의 모의잠수도 실시하였다 (Bennett et al., 1982).

4) 하이드헬리옥스와 하이드록스 (Hydreliox: 수소+헬륨+산소, Hydrox: 수소+산소)

300 msw 이상에서는 수소와 산소의 혼합기체인 하이드록스 (Hydrox)나 수소, 헬륨과 산소의 혼합기체인 하이드렐리옥스 (Hydreliox) 등이 사용될 수 있다. 이미 언급한 바와 같이 질소의 마취현상때문에 50 msw 보다 깊은 곳에서는 헬리옥스를 사용하나, 헬리옥스도 약 250 msw 부터는 HPNS 와 호흡기체의 밀도증가에 따른 호흡저항 때문에 잠수작업에 지장을 주게된다.

헬륨을 사용한 혼합기체의 사용은 1920년대를 전후로 시작하여 1930년대말에 실용화 되었으나, 그 당시 헬륨은 미국을 제외한 나라들에서 매우 귀한 기체였다. 한 단편적인 예로 1948년 영국해군 잠수사가 바다에서 164.6 msw (540 msw) 잠수를 할 때 사용된 헬륨은 미국에서 제공되었던 전쟁 잉여물자였다. 이러한 과정에서 스웨덴 기술자 Arne Zetterstrom (1948)이 수소와 산소를 혼합한 기체를 사용하였다. 수소가 혼합된 기체의 폭발성은 잘 아는 사실이지만, 산소가 4 % 이내인 혼합기체에서의 수소는 폭발하지 않는다 (U.S. Navy Diving Manual Vol. 2, 1991). 물론 이 혼합기체로 수면위에서는 생명을 유지할 수 없지만, 30 msw (4 Ata)에서는 대기압보다 산소 분압이 4배 증가하므로 대기압하의 산소 16 % 와 동등한 효과를 갖는다. 이러한 원리로 그는 96 % 질소와 4 %의 산소로 공기를 대신하였고, 다시 96 % 의 질소를 수소로 대체하였다. Zetterstrom 은 이 혼합기체를 사용하여 1945년 110 msw 까지 몇차례의 성공적인 잠수를 하였으나, 161 msw (528 fsw) 잠수후 불행히도 동료 (Top-Side Support Personnel) 의 착오로 잠수사는 급속히 상승케 되었고 결국 사망하였다.

그럼에도 불구하고 1968년부터 수소 혼합기체를 사용하는 실험이 본격적으로 시작되어, 1985년에는 하이드렐리옥스를 사용한 최초의 포화잠수 실험을 450 m 까지 하였다 (Comex Scientific Management, 1985). 이어서 1986년 7월부터 1988년 2월에 걸쳐 행하여진 실험에서 534 msw 까지 잠수를 하였고 (Ciesielski and Imbert, 1988), 또한 모의시험 가압실 (Simulator)에서는 600 m 수준까지 유인 시험잠수에 성공하였다 (Luther et al., 1988). 최근에 이르기까지 이 혼합기체를 사용한 실험들은 Gardette et al.(1987)의 논문에 잘 정리되어 있다.

그러나 아직 수소를 사용하는 방법이 실제 현장에서 상업적으로 사용되기 위해서는 저장이나 다루는 방법, 폭발 위험성에 따른 대책 등이 구체적으로 연구되어야 할 과제로 남아 있다. 또한 이 혼합기체의 사용수심 (범위), 장기간 호흡함에 따른 부작용 등도 계속 연구되어야 한다 (Gardette et al., 1990).

3.3 헬륨의 사용으로 인한 문제점들

1) 경제성

헬륨과 산소로 구성된 혼합기체를 사용할 경우, 질소마취 문제는 해결되지만 가격이 비싸지게 된다. 이는 단순히 기체 종류와 장비, 인원운영면에서 본 것이며, 혼합기체를 사용하여야만 되는 작업수심 및 이로 인한 경제성은 고려되지 않은 것이다.

2) 열 손실

심해의 찬물에서 잠수하는 경우, 잠수사에게 일어나는 열손실은 전도 (conduction),

대류 (convection), 복사 (radiation) 및 기화 (evaporation)의 4가지 형태로 구분할 수 있다. 그중 호흡으로 인한 열손실은 매우 찬 공기로 호흡하는 경우일지라도 대기 압인 경우에는 전체 열손실의 10 %를 넘지않는다 (Webb, 1982). 그러나 주위 환경과 같은 압력의 기체로 호흡하는 경우 호흡으로 인한 열손실은 호흡기체의 밀도와 비열에 비례한다. 헬륨은 질소보다 가볍지만, 열전도 계수는 약 7배 크며 비열은 약 5배 크다. 따라서 잠수사의 체온 손실이 빠르고 많게 된다. 자연적으로 신체 외부로부터의 보온장치가 필수적이다.

3) 음성 (Donald Duck Effect)

헬륨을 호흡하면서 말을 하게 되면, 공명 주기 성분 (Resonance Frequency Components)이 증가하게 되어, 디즈니 만화영화에 나오는 오리 소리 (Donald Duck Sound)처럼 음성이 변화되어 알아듣기 힘들어진다. 이 현상은 수심이 깊어짐에 따라 심해진다. 한 연구소의 259 m (850 ft) 실험에 의하면, 잠수사의 대화 인지 정도가 5 % 미만인 것으로 나타났다. 이러한 문제는 전자회로를 이용한 음성주파수 변환장치 (Speech Unscrambler)의 개발로 보완되었다.

4) 통과성

헬륨은 질소보다 분자크기가 작으므로 확산 (Diffusion)이 잘되고, 질소가 통과하지 못하는 여러 밀폐장치부위 (Pressure Seals)를 통과할 수도 있다. 예상치 않은 헬륨의 통과 (Penetrate)로 인한 전기부품, 전선, 진공관, 방압시계 등의 훼손이 그 좋은 예이다. 하지만 장비에 대한 설계 개선 및 기술의 개발로 헬륨 확산 문제는 해결되었다.

5) 고압신경증후군 (HPNS: High Pressure Nervous Syndrome)

약 90 msw (300 fsw)에서 공기를 호흡하여 나타나는 (질소) 마취 증세는 헬륨으로 호흡할 경우 약 420 msw (1400 fsw)에 이르러야 헬륨으로 인한 마취현상이 나타난다. 하지만 앞절에서 언급한 바와 같은 HPNS가 경우에 따라 다르겠지만, 약 150 msw부터 나타나기 시작하여 약 300 msw에서는 대개가 나타난다. 그러나 신체적 특성, 가압 과정 등에 따라서는 그 이상의 수심에서도 별 문제가 안될 수도 있다. 여하튼 HPNS는 갑작스레 예기치 못하게 나타날 수 있는 증세로서, 임상자료도 충분치 못한 실정이며, 생리학적 발생 원인이나 과정 (Physiological Process)도 명확히 규명되지 않은 상태이다. 단지 헬륨의 특성과 아울러 급격한 압력 변화율로 인한 반응이나 효과, 심리적 압박감이나 가압의 문제 등, 복합적인 요인으로 인한 증세로 알려지고 있다.

HPNS의 증세로는 경련, 메스꺼움, 어지러움이나 구토증 외에도 눈을 잃고, 악몽 (Black Bird Syndrome), 소화불량, 설사, 호흡장애, 관절통, 작업능률이 떨어지고 균형감각 저하 등이 나타나고, 체중감소를 가져오는 경우가 있다. 이 같은 HPNS를 억제 하거나 방지하기 위하여 많은 연구와 모의잠수 및 실험 등을 통하여 다음과 같은 방법

들이 효과적임을 알게 되었다.

- 잠수사 선발시 내성이 강한자를 우선으로 한다.
- 가압을 천천히 하며, 압력 적응을 위하여 정지시간 (Stop Time)을 길게한다.
- 가압 완료후 작업전까지 적당한 적응시간을 갖는다.
- 질소마취 효과를 응용하여, 트리믹스나 수소 혼합기체를 사용한다.
- 원하는 잠수 수심보다 얕은 수심에서 포화시킨다. (Excursion) (Fig. 4 참조)

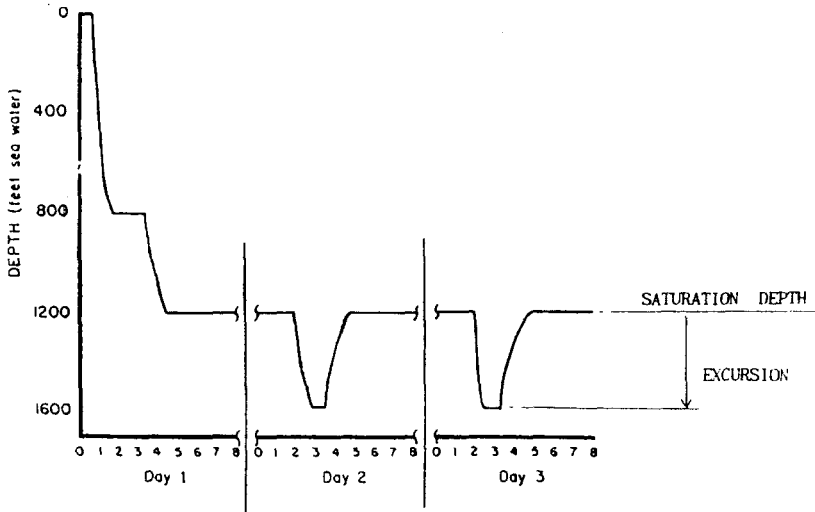


Fig. 4 Example of Excursion Diving.

3.4 혼합기체를 이용한 잠수방법 (운용)

혼합기체 잠수의 운용은 다음과 같이 크게 두 가지 - 비교적 얕은 수심에서 단시간 작업시 적용되는 비포화잠수와 장시간의 작업을 가능케하는 포화잠수 - 로 나눌 수 있다.

1) 비포화잠수 (Non-saturation Diving)

비포화잠수란 문자 그대로 인체에 기체가 포화되지 않는 상태로, 작업의 성격상 단시간의 잠수만을 필요로 할 때 적용하는 방법이며, 작업종료후 상승하면서 감압을 한다. 그러나 단시간의 잠수일지라도 장시간에 걸쳐 감압해야 함은 경제성과 다이버의 안전을 고려할 때 비효율적이다. 즉 상승과정에서 장시간 물속에 있어야 한다는 것은 잠수사에게는 불편한 일이며, 추위로 인한 고통과 해면 상태가 거칠어지고 장비에 결함이 생기면 위험한 상황에 처하게 된다. 이런 문제를 해소하기 위해 Fig. 5 와 같은

잠수종 (Diving Bell, SDC: Submersible Decompression Chamber, PTC: Personal Transfer Capsule)을 사용한다.

2) 포화잠수 (Saturation Diving)

비포화잠수는 비교적 적은 인원과 장비로도 운용이 가능하지만 작업수심, 특히 시간의 제약을 받게 된다. 대개 약 90 m 이상에서 장시간의 작업을 위해서는 포화잠수가 필요하다. 포화잠수는 이미 미국, 영국, 프랑스 등 여러 나라에서 군사적, 상업적, 학술적 목적으로 실용화하고 있다. 포화잠수의 기본 개념은 어느 수심에서 일정기간 체류하면 불활성기체가 더 이상 인체속으로 흡수되지 않는다는데 있다. 따라서 일주일동안이나 하루를 잠수했거나 간에 상승시 인체에서 제거해야 할 기체의 양은 같다. 즉 감압시간이 같다는 것이다. 이론적으로는 시간의 제약없이 잠수사가 작업수심에 머물 수 있게 한다. 포화잠수는 수면위 (선상)에 많은 지원인원과 장비를 필요로 하지만 (Fig. 6) 장시간의 작업을 가능케하며, 경제적으로 실용적이다.

실제 작업에서 일단 포화잠수가 시작되면 잠수사들은 인체의 세포조직이 포화된 채로 몇 주간 선상 감압실 (DDC: Deck Decompression Chamber) 내에서 생활하며, 잠수종을 이용하여 수중의 작업장으로 고대로 투입된다 (Fig. 7). 거주하는 선상 감압실 내부압력은 실제 잠수하는 수심에서의 압력보다 약간 낮다. 불활성 기체로 포화된 인체의 조직이 정상으로 돌아오려면 여러날 계속되는 감압절차가 필요하다. 이러한 감압절차는 매우 복잡한데, 최근에는 컴퓨터 데이터 뱅크 (Imbert and Bontoux, 1988)를 감압절차의 효율화에 이용하고 있다.

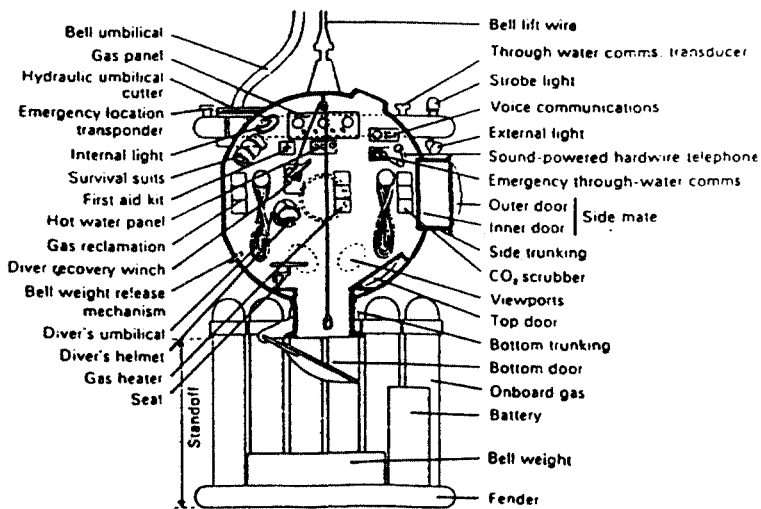


Fig. 5 Diving Bell Layout (from Sisman, 1982).

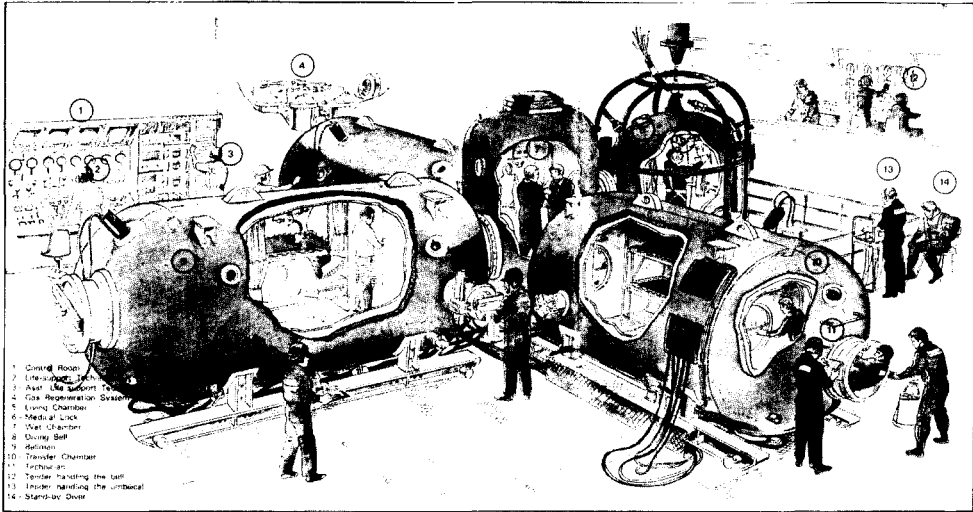


Fig. 6 Operation of Deep Diving System (from Comex Service).

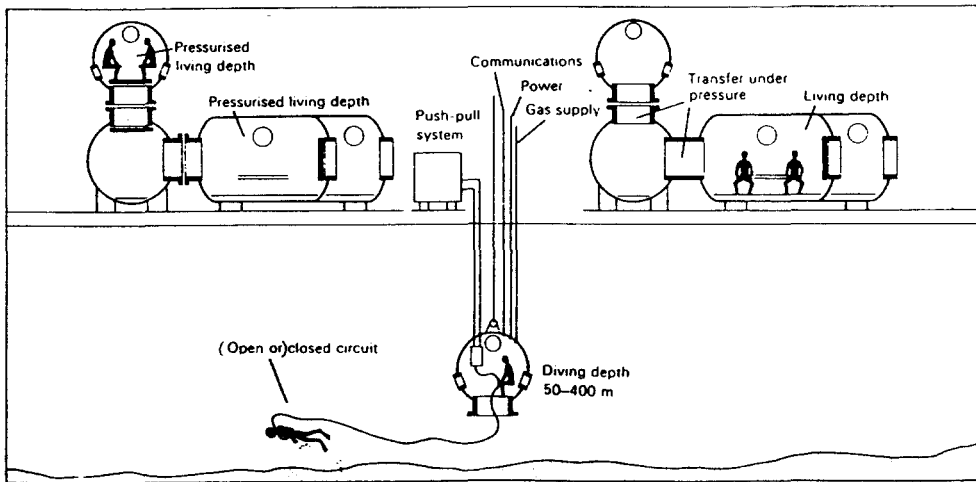


Fig. 7 Mixed Gas Saturation Diving (from Sisman, 1982).

3.5 심해잠수 시스템의 구성 (Deep Diving System)

잠수 시스템 (Diving System)은 공기용과 혼합기체용으로 나뉘어진다. 혼합기체용은 다시 비포화잠수용과 포화잠수용으로 구분되며, 작업 수심의 증가에 따라 공기 잠수, 혼합기체 비포화잠수 그리고 혼합기체 포화잠수로 나눌 수 있다. 여기서 이들 각각의 잠수기술 (Technique)이나 장비구성은 중복되는 부분이 많다.

포화잠수 시스템은 크게 다음과 같이 다섯 가지의 기능으로 구성된다 (Fig. 8, Fig. 9): 잠수종 (Bell), 잠수종 작동 및 잠수조종 (Bell Handling & Dive Control), 선상 가압실 (Deck Decompression Chamber, DDC), 압력실 조정 (Chamber Control), 생명유 장치 (Life Support Equipment).

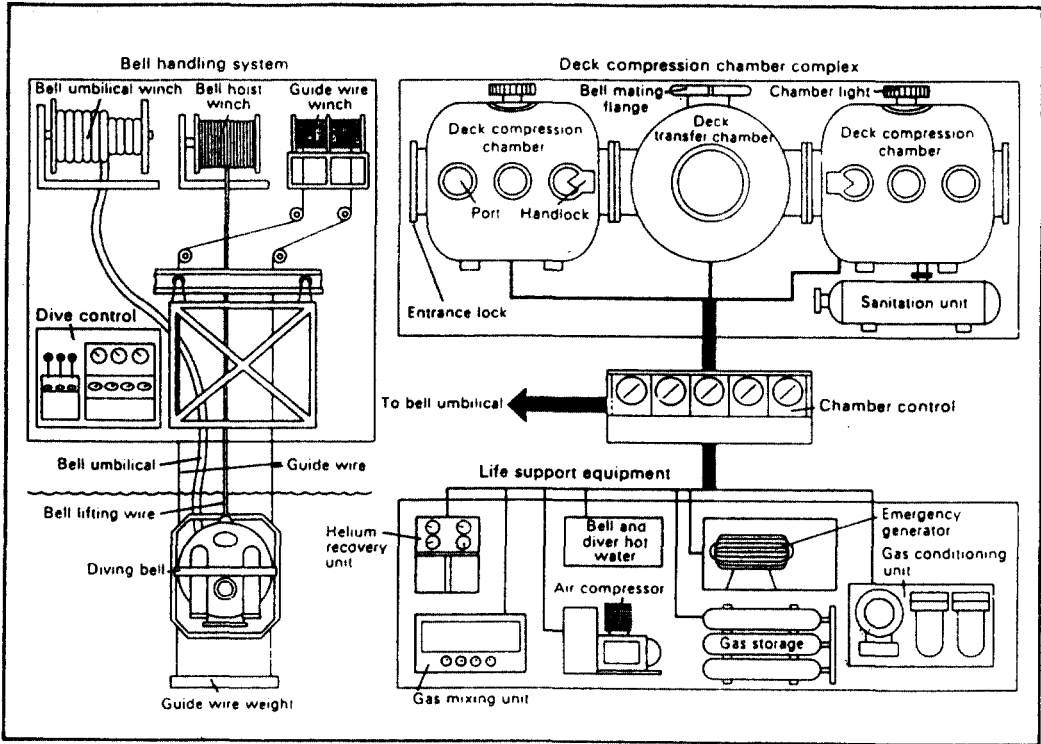


Fig. 8 Block Diagram of the Components of a Deep Diving System
(from Sisman, 1982).

4. 결 언

혼합기체를 사용하여 포화잠수를 독자적으로 수행할 수 있는 국가는 아직 몇 나라에 국한되어 있다. 국내에서는 해군과 일부 관련 의학자들을 중심으로 극히 제한적이고도 초보적인 연구가 수행되고 있을 뿐이며, 아직 상업적이나 학술 연구의 목적으로 사용할 수 있는 잠수 시스템은 없는 실정이다.

우리나라도 해저탐사, 해난구조, 해양구조물 공사 - 해저 케이블, 파이프라인 공사 등 점차적으로 잠수기술에 대한 요구가 증가하고 있어, 조만간 포화잠수 능력을 갖추게 될 것으로 예상된다. 그러나 아직 학계에서나 민간 기업 차원에서는 이를 위한 잠수기술의 연구 및 개발에 대하여 관심을 보이지 않고 있다. 이러한 잠수기술을 갖추기 위해서는, 정부나 기업에서 과감하게 자본을 투자하여 잠수 시스템을 마련하고, 학계와 공동으로 이 방면에 대한 기술 축적을 이룩해야 할 것이다.

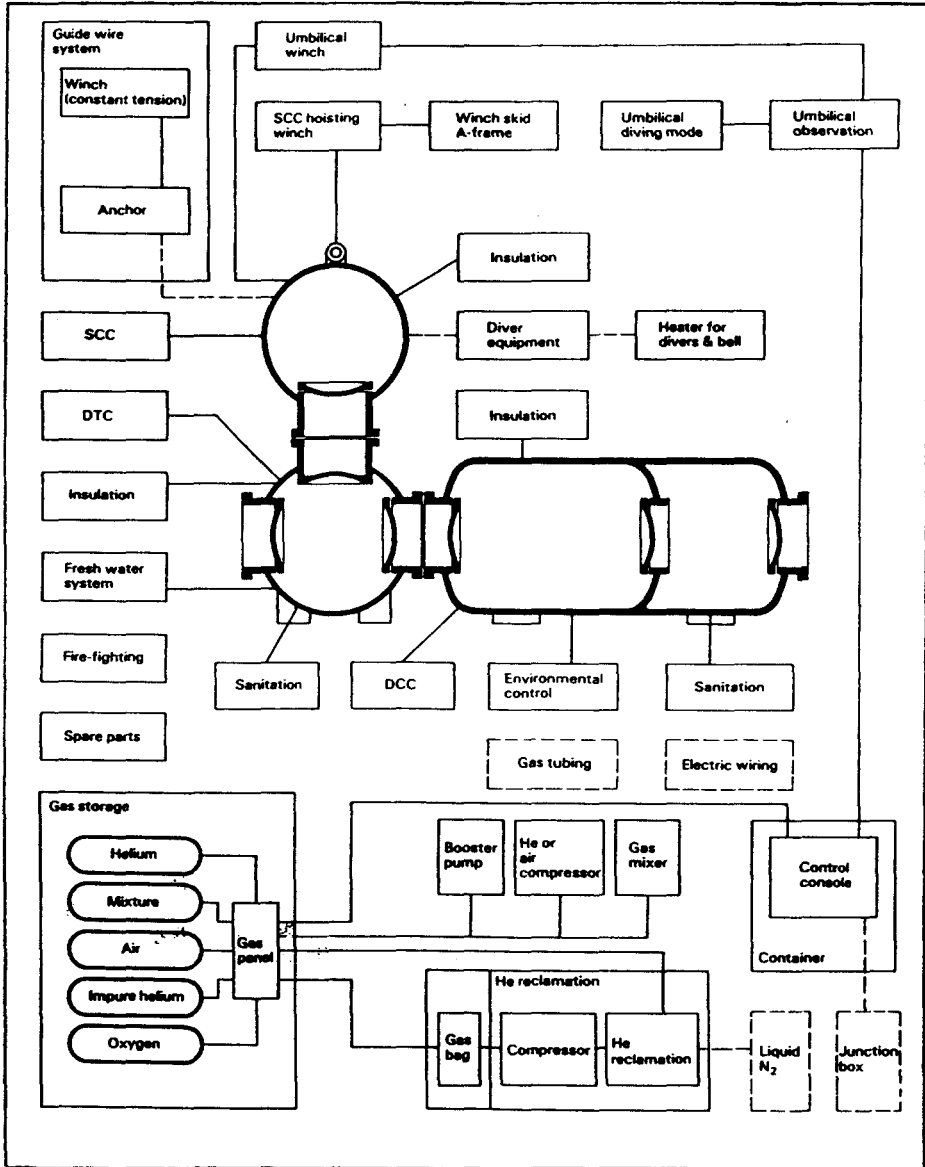


Fig. 9 Major Component of a Saturation Diving System (from Haux, 1982).

5. 참고 문헌

- Behnke, A.R. and Willmon, T.L., 1939, "USS Squalus: Medical Aspects of the Rescue and Salvage Operations and the Use of Oxygen in Deep-sea Diving", U.S. Navy Med. Bull. 37, p629-640.
- Behnke, A.R. and Willmon, T.L., 1941, "Gases Nitrogen and Helium Elimination from the Body During Rest and Exercise", Amer. J. of Physiol. 131, p619-626.
- Bennett, P.B. et. al., 1967, "The Effect of Raised Pressures of Inert Gases on Phospholipid Model Membranes", Life Science 6, p2527-2533.
- Bennett, P.B. et. al., 1982, "Effect of Compression Rate on Use of Trimix to Ameliorate HPNS in Man to 686 m (2250 ft)", Undersea Biomed. Res. 9, p335-351.
- Bennett, P.B., 1982a, "Inert Gas Narcosis", The Physiology and Medicine of Diving, 3rd ed., Best Publishing Co., p239-261.
- Bennett, P.B., 1982b, "The High Pressure Nervous Syndrome in Man", The Physiology and Medicine of Diving, 3rd ed., Best Publishing Co., p263-296.
- Bennett, P.B., 1990, "Inert Gas Narcosis and HPNS", Diving Medicine, 2nd ed., W.B. Saunders Co., p69-81.
- Bond, G., 1964, "New Developments in High Pressure Living", Arch. Env. Health 9, p310-314.
- Bove, A.A. and Wells J.M., 1990, "Mixed Gas Diving", Diving Medicine, 2nd ed., W.B. Saunders Co., p50-58.
- Ciesielski, T. and Imbert, J.P., 1989, "Hydrogen Offshore Diving to a Depth of 530 m: Hydra VIII", OTC 6073., p1-4.
- Comex Scientific Management, 1985, Hydra V.
- Gardette, B. et al., 1987, "Life in a Hyperbaric Environment. A New O₂-H₂ Breathing Mixture for Industrial Diving", Proc. of the Space & Sea Colloquium, Paris., p31-40.
- Gardette, B. et al., 1990, "Long Duration Hyperbaric Confinement: Hydra IX", Proc. of the Space & Sea Colloquium, Paris., p63-68.
- GKSS, 1991, Mixed Gas/Saturation Diver Training Manual, GKSS-Forschungszentrum, Geesthacht.
- Graver, D.K., 1992, "Recreational Nitrox Use poses Questions", Sources March/April, The J. of Underwater Education, NAUI Diving Association.
- Haux, G.F.K., 1982, Subsea Manned Engineering, Best Publishing Co., p292-305.

- Hollobone, T.A., 1988, "Review of Standards, Codes, Requirments and Regulations: their Impact on Underwater Projects", Advances in Underwater Technology, Ocean Science and Offshore Engineering, Vol. 14, Submersible Technology, p25-37.
- Imbert, J.P. and Bontoux, M, 1988; "Diving Data Bank: A Unique Tool for Diving Procedures Development", OTC 5707, p237-244.
- Johnson; F.H. and Flagler E.A., 1950, "Hydrostatic Pressure Reversal of Narcosis in tadpoles", Science 112, p91-92.
- Kenny, J.E., 1985, Business of Diving, Gulf Publishing Co., p37-52.
- Kindwall, E.P., 1990, "A Short History of Diving and Diving Medicine", Diving Medicine, 2nd ed., W.B. Saunders Co., p1-8.
- Lawrie, J. A., 1985, "Comparison of Past with Present", Advances in Underwater Technology and Offshore Engineering, Vol.1, Developments in Diving Technology, Graham & Trotman Ltd., p1-17.
- Lever, M.J. et al., 1971, "Pressure reversal of anesthesia", Nature 231, p368-371.
- Lord, G., Bond, G. and Schaefer, K., 1966, "Breathing Under High Ambient Pressure", J. of Appl. Physiol. 21, p1833-1838.
- Luther, G. et al., 1988, "Efficiency of Working Divers in Depths Down to 600 m", OTC 5706, p227-235.
- Rosengren, P., 1988, "Saturation Diving: Diving Deeper Than 300 m", Advances in Underwater Technology, Ocean Science and Engineering, Vol. 14, Submersible Technology, p129-132.
- Rostain, J.C. et al., 1988, "Effect of a H-He-O Mixture on the HPNS up tp 450 msw", Undersea Biomed. Res. 15, p257-270.
- Simon, S., Katz, Y. and Bennett, P.B., 1975, "Calculation of the Percentage of a Narcotic Gas to Permit Abolition of the High Pressure Nervous Syndrome", Undersea Biomed. Res. 2.
- Sisman, D., 1982, The Professional Diver's Handbook, Submex Ltd.
- U.S. Navy Diving Manual, Vol.2: Mixed Gas Diving, 1991, NAVSEA 0994-LP-001-9020, Naval Sea Systems Command.
- U.S. Navy, Diving and Salvage in the United States Navy.
- Webb, P., 1982, "Thermal Problems", The Physiology and Medicine of Diving, 3rd ed., Best Publishing Co., p298-318.
- Zetterstrom, A., 1948, "Deep Diving with Synthetic Gas Mixtures", MIL SURG 103, p104-106.