

Nitrox 공기통의 기체 분석에 의한 스쿠버다이버 사망원인 추정에 관한 사례연구

이준배[†] · 유재훈 · 손성건 · 성태명* · 팽기정**

국립과학수사연구원 동부분원 이화학과 · *국방부 조사본부 이화학과 · **연세대학교 화학 및 의화학과
(2011. 2. 9. 접수 / 2011. 4. 14. 채택)

Case on the Death of Scuba Diver by Analyzing the Air in Nitrox Cylinder

Joon-Bae Lee[†] · Jae-Hoon You · Shungkun Shon · Tae-Myung Sung* · Ki-Jung Paeng**

Eastern District Office, National Forensic Service

*Department of Chemistry, Criminal Investigation Command

**Department of Chemistry, Yonsei University

(Received February 9, 2011 / Accepted April 14, 2011)

Abstract : Going underwater is supposed to begin with the history of human beings. At first it was confined to relatively shallow level, less than several meters by holding breath. Recently, deep level diving has been necessary for such purpose as construction, maritime salvage, military operations, research and sports by using SCUBA(self-contained underwater breathing apparatus) equipment. As one goes down into water, the pressure on the diver is increased due to water pressure with depth, usually 1 atm for each 10 m water level. In deep water, mixed gas or nitrox (EAN, enriched air nitrox) could be applied for the divers lest they should get disease due to high pressure. Of these, the former is usually composed of oxygen and inert gas like helium or hydrogen, the latter contains higher oxygen content than that in normal air in which the oxygen concentration is designated by the character "EAN" followed by vol. % of oxygen, for example, "EAN 40" contains 40% of oxygen. In this case, a victim was found at the 39 m below the sea surface breathing air and nitrox in cylinder wrongly marked as EAN 36, which was analyzed to contain 63% of oxygen by GC/TCD. The cause of death could not be exactly related with the oxygen content in the nitrox cylinder, because the accurate depth for the victim to dive was not known, even though the victim was just found at the depth of 39 m. However, the wrongly marked nitrox could be believed to be the main cause of the death at the depth unless there happened any other accident except that during diving.

Key Words : nitrox diving, EAN, GC/TCD

1. 서론

해저에서의 어로활동, 산업잠수, 수중 군사작전 및 여가생활의 일환으로 수중 잠수활동이 증가되는 추세에 있으며, 잠수활동시 공기통을 이용한 스쿠버(SCUBA, self-contained underwater breathing apparatus) 장비가 흔히 사용되고 있다. 국내에서만도 레저활동의 일환으로 약 30만여명에 이르는 스쿠버 다이빙 동호인이 있고 이들에 대한 교육은 여러 단체에 의해 개별적으로 진행되며 교육단체별로 교육내용과 기준이 상이한 것으로 알려져 있다¹⁾. 이

러한 상황에서 관리감독의 소홀이나 불충분한 안전장비 및 안전규정을 뛰어넘는 무모한 잠수활동은 잠수병뿐만 아니라 인명사고까지 야기할 수 있다. 현재 국내에서 스쿠버 다이빙 활동시 안전과 관련한 법령이나 관리주체는 명확하지 않은 상태에서 이와 관련된 정확한 사고통계는 확인하기 어려운 실정이다. 다만 2006년도의 경우 국내에서 레크리에이션 다이빙시 감압치료사례가 250여건이 넘는 것으로 보고되어 있으며 이는 다이버의 인원이 많은 호주나 태국에서의 약 150건 내외인 것에 비하면 다이버 수에 대한 감압치료사례의 비율이 상대적으로 높은 것임을 알 수 있다¹⁾.

이와 같은 사고는 주로 수심에 의한 압력 증가에 기인하는 것으로, 수압을 받는 인체는 여러 생리적

[†] To whom correspondence should be addressed.
pajlee@korea.kr

Table 1. Various pressure unit for 1 atm

1 atm = 760 mmHg = 760 torr = 10.33 mH ₂ O
= 101,325 N/m ² = 1.033 kg/cm ²
= 101,325 pascal(Pa) = 1,013 hPa
= 1.013 bar = 14.7 psi(lb/in ²)

인 변화를 겪게 된다. 압력은 과학과 공학의 여러 분야에서 그 나름대로 상용하는 압력 단위가 많이 다양하게 나타낼 수 있어 1 기압(atm)의 경우 Table 1에서와 같이 여러 가지로 표현될 수 있다²⁾.

특히, 1 기압은 수두로 환산하였을 경우 약 10.33 m의 높이에 상당하는 것으로, 약 10 m 수심에 대하여 1 기압씩 증가하는 것과 같다. Fig. 1은 잠수 과정에서 수심에 따른 압력과 이때의 기체 분압(partial pressure)을 보여준다.

수압에 의한 인체 영향 중 대표적인 것으로, 깊은 수심에서 압축한 일반 공기를 호흡한 다음 감압 과정 없이 급격한 상승을 하였을 때에 발생하는 잠수병(bends)이 있다. 잠수병은 수중에서 호흡한 압축 공기 중 산소(O₂)는 호흡작용에 사용되는 반면, 질소(N₂)는 대사되지 않고 체내에 용해되는 것에 기인한다.

Table 2에서와 같이 질소는 헬륨(He)에 비해 인체 지방 등에 약 5배 정도 용해도가 큰 것으로 알려져 있으며^{3,4)} 체내에의 질소흡수량은 기체의 용해도에 대한 헨리(Henry)의 법칙에 따라 수온에 반비례하고 수심에 따른 수압과 잠수시간에 비례하여 증가한다. 체내에 용해되어 있던 질소는 급격한 부상시 혈관이나 뼈조직 등에서 기포를 형성하여 신

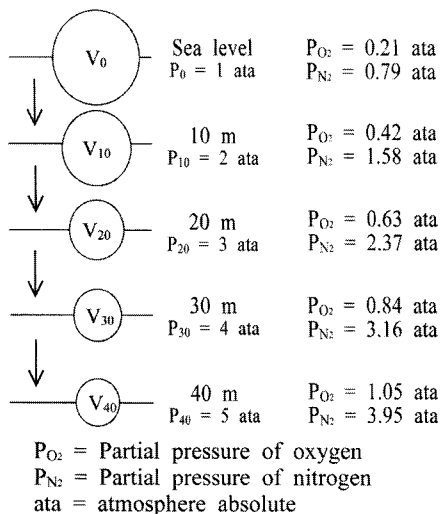


Fig. 1. Pressure change and the partial pressure of each gas in air with water depth.

Table 2. Correlation of narcotic potency of the inert gases, oxygen and carbon dioxide⁴⁾

Gas	M.W.	Solubility in lipid	Oil/Water solubility ratio	Relative narcotic potency
He	4.0	0.015	1.7	4.26
Ne	20.0	0.019	2.07	3.58
H ₂	2.0	0.036	2.1	1.83
N ₂	28.0	0.067	5.2	1
Ar	40.0	0.14	5.3	0.43
Kr	83.7	0.43	9.6	0.14
Xe	131.3	1.7	20.0	0.039
O ₂	32.0	0.11	5.0	-
CO ₂	44.0	1.34	1.6	-

체에 각종 부작용을 일으키게 된다. 이 현상은 마치 탄산음료 병 마개를 갑자기 열었을 때 녹아있던 이산화탄소 기체가 발포하는 것과 유사하다고 볼 수 있다.

이외에도 고압조건에서 잠수병 뿐만 아니라 질소마취(nitrogen narcosis), 산소중독(oxygen toxicity), 폐손상(pulmonary damage) 등의 증상이 일어날 수 있다^{5,6)}. 이런 증상을 극복하고 수중 체류시간의 증가를 위하여, 혼합기체 잠수법이 개발되었다. 혼합기체의 종류에 따라 나이트록스(nitrox)나 헬리오스(heliox), 하이드록스(hydrox) 등이 있으며 이 가운데 헬리오스나 하이드록스를 사용하는 잠수법은 산소와 함께 헬륨이나 수소 등을 추가하는 방법으로서 고순도 헬륨의 가격이 고가이며 수소의 경우 취급시 폭발 등의 위험성이 있어 사용에 어려운 점이 있다. 반면, 질소 및 산소 기체의 함량 조절에 의한 나이트록스는 이같은 점에서 경제적이며 제조가 비교적 안전하고 용이하여 혼합기체로 흔히 사용되는 방법이다. 나이트록스에서 산소의 함량은 산소의 부피 %를 EAN 다음의 숫자로 표시하며, 제조과정은 Fig. 2와 같이 일반 공기의 압축과정에서 압축산소를 추가하는 방법으로 이루어진다⁵⁾.

나이트록스 잠수는 질소마취감소, 수중활동시간 증가 및 잔류질소량 감소 등의 장점을 보여 과학,

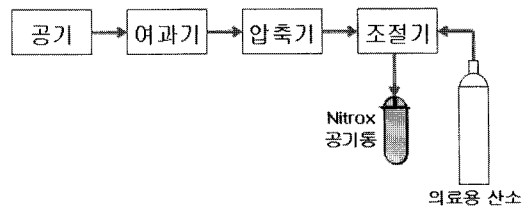


Fig. 2. Process for compressing EAN.

Table 3. MOD for EAN 36

$$\begin{aligned} \text{MOD} &= P_{O_2}(1.6) / O_2 \text{ vol. fraction} \\ &= 1.6 / 0.36 \\ &= 4.44 \text{ ata} \\ &= 3.44 \text{ atg} \\ &= 35.5 \text{ mH}_2\text{O} \end{aligned}$$

MOD = maximum operating depth
ata = atmosphere absolute (= atg + 1 atm)
atg = atmosphere gauge

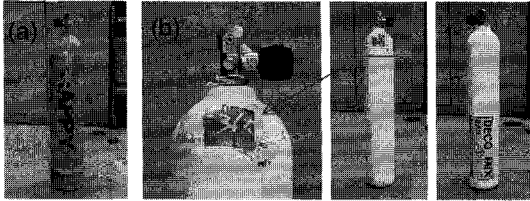


Fig. 3. Cylinders used at the accident, (a) compressed air cylinder (b) EAN 36 cylinder.

래저 분야에서 사용되고 있으나 산소중독의 위험성이 있어, 산소분압이 1.6 ata(atmosphere absolute, 절대압력)를 초과하지 않는 수심으로 그 사용이 제한된다⁶⁾. 예를 들어, EAN 36을 사용하였을 경우 최대잠수깊이(MOD, maximum operating depth)는 Table 3에서와 같다.

본 사례는 피해자가 강원도 동해시 인근 약 1 마일 해상에서 Fig. 3과 같은 일반 공기통과 나이트록스(EAN 36) 공기통을 이용한 혼합기체를 이용한 잠수 중 실종되어 약 39 m의 해저에서 변사체로 발견된 사건으로, 이 사례에서 변사자가 사용한 공기를 기체크로마토그래피-열전도도검출기(GC/TCD)에 의한 조성 확인과 더불어 다른 공기통과 관련된 사례를 통하여 스쿠버 잠수에서 일어날 수 있는 사고의 가능한 원인을 추정하고자 한다.

2. 실험

2.1. 재료 및 분석기기

공기통의 조성확인을 위한 검량선 작성시, KNF Neuberger사의 다이아프램 진공펌프로 잔류기체를 제거한 Supelco사의 0.5 L 기체포집용 Tedlar bag에 99.99% 이상의 의료용 산소와 질소를 각각 포집한 다음 Hamilton제 gas tight syringe를 사용하여 일정 부피를 채취하고 농도별로 10 mL 바이알에 주입하여 혼합기체 표준품을 제조하였다. 질소나 산소와 같이 단순 이원자 분자 기체의 분석은 GC/TCD로 가능하기 때문에 혼합표준기체와 공기통 공기에 대하여 열전도도 검출기(TCD, thermal conduc-

tivity detector)가 장착된 Hewlett Packards사의 6890 GC(gas chromatography)를 분석에 이용하였다. 운반기체(carrier gas)로 헬륨을 사용하였으며 제올라이트 등의 분자체(molecular sieve)로 충전된 컬럼을 통과시켜 시료인 혼합 기체를 각 성분으로 분리하고 각 기체의 해당 머무름 시간(retention time)에서 열전도도 검출기로 분석하였다. 열전도도 검출기는 운반기체와 시료가 포함된 운반기체의 열전도도 차이를 측정하여 검출하며⁷⁾, 기체의 열전도도는 기체의 분자량 및 비열과 관련이 있어 일반적으로 분자량이 작을수록 비열이 감소하게 되고 열전도율은 증가하게 된다. 따라서 기체 중에서 분자량이 가장 작은 수소는 열전도율이 양호하여 대용량 발전기의 고정자와 회전자 등의 냉각용 기체로 사용되기도 한다⁸⁾.

2.2. 실험방법

10 mL 바이알을 밀봉한 후 질소기체 라인과 진공펌프 라인을 연결하여 플리싱(flushing)함으로써 질소 분위기로 만든 다음, gas tight syringe를 사용하여 산소 농도가 vol. %로 5~70% 되도록 혼합표준기체를 단계적으로 제조하였으며 Table 4와 같은 조건에서 gas tight syringe로 각각 100 μ L 주입하여 분석하였다.

2.3. 검량선 및 검출한계

10 mL 바이알에 농도별로 제조된 혼합표준기체의 GC/TCD에 의한 가스크로마토그램에서 각 기체의 농도는 각 피크(peak)의 면적에 비례하며 이는 Fig. 4와 같았다. 산소의 vol. %에 따른 산소와 질소 피크 전체 면적에 대한 산소 피크 면적으로 검량선을 작성한 결과 r^2 값은 0.9968의 직선성을 보였으며(Fig. 5), 검출한계를 산소 피크에 대한 노이즈의 표준편차의 3배로 하였을 때 산소에 대한 검출한계는 0.1 vol. %였다.

Table 4. GC/TCD condition

Instrument	Condition	
GC/TCD	Injector temp.	230°C
	Carrier Gas	He
	Oven temp.	90°C(isothermal)
	Column	Molecular sieve (MS-5A, 10 ft length \times 2.0 mm ID \times 1/8" OD)
	Detector temp.	230°C
	Detector reference flow	30.0 mL/min

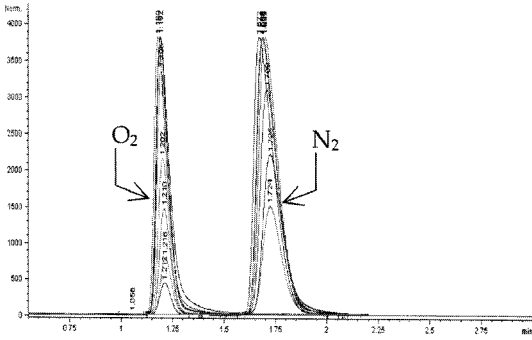


Fig. 4. Chromatogram for standard mixed gas.

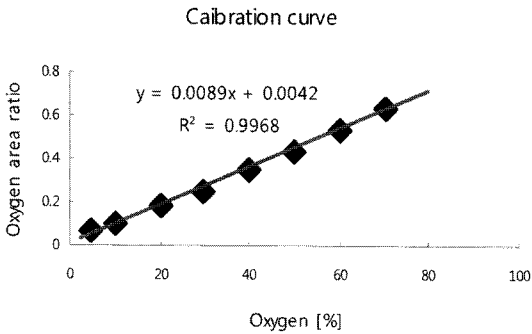


Fig. 5. Calibration curve for oxygen.

3. 결과 및 고찰

3.1. Nitrox 공기통 공기에 대한 분석

변사자가 사용하던 일반 공기통 공기와 EAN 36 공기통 기체에서 GC/TCD에 의한 가스크로마토그램은 Fig. 6과 같았고 일산화탄소 등의 유해가스는 확인되지 않았으며, 2.3절에서 얻은 검량선을 이용하여 산소농도를 구한결과 일반 공기통에서 약 21%의 산소와 78%의 질소가 확인되었다. 그러나 36%의 산소가 함유되어야 할 EAN 36 공기통에서는 약 63%의 산소와 36%의 질소가 확인되었다.

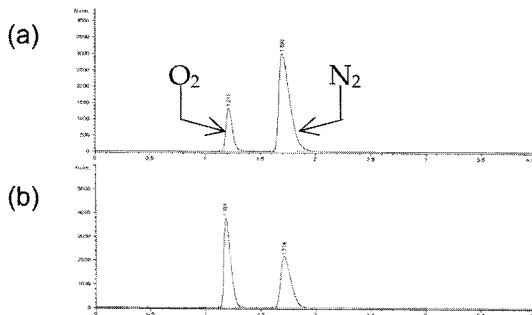


Fig. 6. Chromatogram for (a) compressed air cylinder and (b) EAN 36 cylinder.

이는 EAN 제조시 산소와 질소 농도를 오인 설정한 결과로 추정되며 63%의 산소가 함유된 공기를 사용하였을 경우 산소분압이 1.6 ata를 초과하지 않는 최대잠수깊이(MOD)는 약 15.9 m로 계산되었다(Table 5). 정상적인 EAN 36 공기통을 사용하였을 경우 MOD는 Table 3에서와 같이 약 35.5 m였으나 63%의 산소가 함유된 나이트록스를 사용하여 이 정도 수심까지 잠수하였을 경우, 잠수시간, 신체상태 등에 따라 차이가 있을 수는 있지만, 산소중독 증상을 추정할 수 있었다. 산소중독에 의한 증상은 일명 conventid라 하며, 이는 산소중독시 제증상에 해당되는 영어단어의 머릿글자에서 유래한 것이다(Table 6). 이와 유사하게, 호주에서 특이한 병력이 없으며 잠수 경험이 풍부한 47세의 다이버가 나이트록스와 일반 압축공기를 호흡하여 47 m까지 잠수한 뒤 사망한 사건과 관련, 나이트록스 중 50%의 산소를 확인하였다. 이 사건에서 나이트록스를 일반 압축공기로 오인하여 호흡한 것에 기인한 산소중독을 사망원인으로 추정한 사례가 보고되어 있다⁹⁾.

3.2. 공기통에 대한 고찰

본 사례에서 변사자가 착용한 공기통 내부의 부식여부에 대해서는 조사할 수 없었으나, 일반적으로 외부로부터 기체에 일을 가하여 압축하는 과정에서 온도가 상승하고 아울러 압축시 포화된 공기 필터를 사용하였을 경우 수분이 혼입될 가능성이 있다. 혼입된 수분은 압축되어 고온이 된 공기통 내부에서 고압의 산소에 의한 산화성 분위기에서 부식을 야기할 수 있다.

외부로의 냉각 등이 없는 이상적인 경우라면 최종온도(T_f , K)는 압력 및 기체의 비열비(γ) 등과 관

Table 5. MOD for the air containing 63% oxygen

$$\begin{aligned} \text{MOD} &= P_{\text{O}_2}(1.6) / \text{O}_2 \text{ vol. fraction} \\ &= 1.6 / 0.63 \\ &= 2.54 \text{ ata} \\ &= 1.54 \text{ atg} \\ &= 15.9 \text{ mH}_2\text{O} \end{aligned}$$

Table 6. Oxygen toxicity(conventid)

- Convulsion (경련)
- Vision (시각이상)
- Euphoria (행복감)
- Nausia (구역질)
- Tinnitus (이명)
- Irritability (과민증)
- Dizziness (현기증)

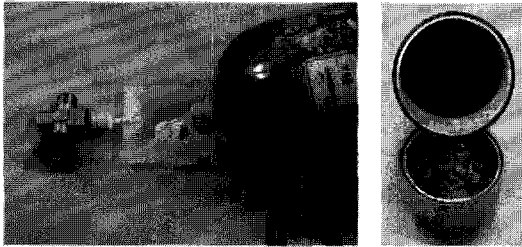


Fig. 7. Corroded inside of air cylinder¹⁰⁾.

런이 있으며 이는 열역학적인 관계식으로부터 다음과 같이 표현할 수 있다¹⁰⁾.

$$T_f = T_i \times \left(\frac{P_f}{P_i}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad (1)$$

식 (1)에서 T_i 는 초기온도(K), P_i 및 P_f 는 초기 및 최종압력을 나타내며 γ 는 압축되는 기체의 비열비(C_p/C_v)를 의미한다. 이원자분자로 공기의 주성분인 산소 및 질소의 γ 는 1.40이며 초기온도와 압력 300 K, 1 기압에서 200 기압까지 이상적으로 가압하였을 경우 단열과 온도에 따른 비열의 변화가 없는 등의 이상적인 조건에서 최종온도는 1,363 K (= 1,090°C)에 까지 이르는 것으로 계산되었다. 실제의 경우 주위로의 열전달 및 열역학적인 비이상성 등으로 이 정도의 높은 온도까지 이르지 못하지만, 적절한 냉각과정 없이 고온, 고압에서 수분이 혼입된다면 공기통 내부 금속의 부식을 배제할 수 없다. 이와 관련된 다른 사례 중, 포화되어 오염된 필터를 사용하여 압축한 공기통 내부에서 Fig. 7과 같이 미세한 부식 생성물을 관찰할 수 있었다¹¹⁾. 부식 생성물 중 공기통 내부 금속인 알루미늄의 산화물이 확인되었으며, 오염된 필터에서 수분과 압축기의 오일성분이 확인되었다. 이 현상은 고압의 산소에 의한 산화성 분위기와 혼입된 수분이 공존하는 상황에서 압축과정 중 발생한 열에 의해 공기통 내부 금속인 알루미늄이 부식된 것으로 사료되었다.

4. 결론

EAN 36 나이트록스(nitrox)를 이용하여 잠수도 중 사망한 본 사례에서, 변사자가 호흡한 나이트록스 공기통의 기체를 GC/TCD로 분석하고, 그로부터 사망원인에 대한 추정을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) GC/TCD를 이용하여 산소와 질소 피크 면적의 합에 대한 산소 피크 면적의 산소농도로 검량선을 작성한 결과 r^2 값은 0.9968의 양호한 직선성을 보였으며, 산소에 대한 검출한계는 0.1 vol. % 였다.

2) 변사자가 사용한 EAN 36 공기통에서 GC/TCD를 이용하여 약 63%의 산소농도를 확인하였다. 이는 공기통에 표기된 36%의 산소농도와는 상이한 것으로, 변사자가 잠수도중 어떤 원인에 의한 사고를 당한 후 수중에서 해수의 흐름에 의하여 발견 지점으로 이동하지 않았음이 확실하며, 이 같은 조성의 기체를 EAN 36으로 오인하고 수심 39 m까지 잠수하였다면, 일반적으로 허용되는 최대산소압력인 1.6 기압을 초과하는 약 3 기압의 산소에 노출되어, 이를 사고의 원인으로 추정할 수 있을 것으로 사료되었다.

3) 아울러 본 사건에서 공기통 내부의 이상여부에 대해서는 조사할 수 없었으나, 일반적으로 공기압축시 오염된 필터의 사용과 불충분한 냉각과정으로 인한 고온이 형성되었을 경우, 공기통 내부에서 부식이 발생할 수 있다. 본 사례와의 관련성에 대해서는 언급하기 어려우나, 공기통 내부에 부식 생성물인 미립자 등이 있을 경우, 이들이 수중에서 공기통 호흡자에게 미치는 영향에 대해서도 고려할 필요가 있으리라 생각된다.

4) 현재 우리나라에서는 스쿠버 다이빙 안전관리와 관련된 법령이 명확하지 않은 상태이며, 이와 관련된 안전관리를 담당하는 전문기관이 없어 스쿠버 다이빙과 관련된 사고의 공식적인 통계를 확인할 수가 없었다. 특히 스쿠버 다이빙은 여가뿐만 아니라, 해양 산업설비, 어로활동, 군사작전 등 여러 분야의 업무와 관련이 있어 어느 단일 기관에 의한 체계적인 관리가 어려운 점이 있을 것으로 생각된다. 이런 점에서, 여러 단체에 의해 개별적으로 시행되는 여가활동을 위한 스쿠버 다이빙의 경우만이라도 스쿠버 다이빙의 안전관리에 관한 제도적인 뒷받침과 업무관련성이 밀접한 해양경찰청이나 국토해양부 등의 단일 국가기관을 통한 관리주체를 설정하고 체계적인 관리가 이루어질 수 있기를 기대한다.

참고문헌

- 1) 임채현, 조대환, “해양레저활동으로서 스킨스쿠버다이빙의 제도적 현황 고찰”, 해양환경안전학

- 회지, pp. 63~68, 2009.
- 2) Steven S. Zumdahl, "Chemistry", 3rd ed., D. C. Heath and Company, 1993.
 - 3) John Scott, "The hygiene of work in compressed air", p. 1694, Lancet, Dec. 14, 1907.
 - 4) 김도현, "우리나라 산업잠수의 현황과 발전방안", 한국 해양대학교, 1999.
 - 5) Direction of Commander, "U.S. Navy Diving Manual", Naval Sea Systems Command, 2008.
 - 6) 김상겸, "스포츠스쿠버다이빙", 씨코, 2004.
 - 7) Ian A. Fowles, "Gas Chromatography", 2nd ed., John Wiley & Sons Ltd., 1995.
 - 8) 한국전력공사 보령화력발전소, "발전편람", 1988.
 - 9) Christopher H Lawrence, "A diving due to oxygen toxicity during "technical" dive", The Medical Journal of Australia, Vol. 165, pp. 262~263, 1996.
 - 10) J.M. Smith, H.C. Van Ness, M.M. Abbott, "Introduction to Chemical Engineering Thermodynamics, 5th ed.", McGraw Hill, 1996.
 - 11) 이준배, 이진훈, 김명덕, "호흡용 압축공기통 증분말에 관한 사례연구", 제12회 사단법인 한국법과학회 추계학술대회 초록집, 국립과학수사연구소, p. 199, 2005.