



실험동물을 이용 산소 및 유해가스 농도에 따른 치사율 연구

김현영

한국산업안전보건공단 산업안전보건연구원
(2013년 6월 17일 접수, 2013년 8월 6일 수정, 2013년 8월 19일 채택)

A Study on the Mortality in Oxygen and Toxic Gas Concentration According using Experimental Animals

Hyeon-Yeong Kim

Occupational Safety & Health Research Institute, Korea Occupational Safety & Health Agency, Korea

(Received June 17, 2013; Revised August 6, 2013; Accepted August 19, 2013)

요약

맨홀 또는 환기가 부족한 공간에서 작업 중 유해 가스나 산소결핍에 의한 질식 또는 급성중독에 의한 건강장해나 사망사고가 빈번히 발생되고 있다. 따라서 유해가스에 의한 급성중독이나 산소결핍에 의한 유해농도 규명과 재해발생시 원인규명 자료로 활용하고자 산소결핍과 유해가스 노출에 따른 사망농도 시험하고자 하였다. 특히 산소결핍 상황에서 유해가스의 영향에 대해서도 시험하였으며, 국내외에서 발생된 관련 각종 사고 사례 조사를 통하여 동종재해를 예방하고자 하였다.

자료를 조사한 결과 산소결핍 또는 유해가스 노출에 의한 사망 재해는 하절기(6-8월)에 전체의 50%가 발생하고, 업종은 건설업 40%, 장소는 맨홀 50%, 원인은 산소결핍이 가장 많았으며(40%), 기타 가스(H₂S, CO, N₂, Ar 등) 및 환경적 요인(내부 온도, 바닥 물 익사)도 크게 작용하였다. 동물실험 결과 산소결핍에 의한 치사 산소농도는 5%수준이었으며 Dose-Response의 통계처리결과 과반수치사농도 LC₅₀(rat, 4hr)는 5.5%로 산출되었다. 또한 산소결핍(6%수준) 상황에서 다른 유해물질이 혼합 될 경우 미치는 치사농도 시험 결과 H₂S 20 ppm에서 40%치사, CO는 600 ppm에서 20%치사, 톨루엔은 1,000 ppm에서도 사망 예가 증가하지 않았다. 즉, H₂S, CO 등은 치사농도에 민감하게 반응하는 유해물질로의 상승작용을 했다.

Abstract - It may occur health hazards or death by suffocation or acute poisoning in case of oxygen deficiency in ambient or exposure to harmful gas. As a part of accident prevention, we studied the change of activity and lethal dose by changing the concentration of several hazardous gas with inhalation exposure chamber and laboratory animals. We investigated the lethality and motility change during either the 4 hrs whole body exposure to oxygen, nitrogen, toluene, H₂S, CO and 48 recovery.

As results, it is estimated that 5% oxygen concentration as lethal concentration and 5.5% as LC₅₀ (rat, 4 hrs) with statistics for dose-response. The results of lethality in oxygen deficient condition (approximately 6%), the lethality were 40%, 20% with 20 ppm H₂S, 600 ppm CO respectively, and was not increased the lethality with 8% CO. Thus, it was confirmed that the H₂S, CO had influence to lethal dose, while toluene had low influence.

Key words : Oxygen concentration, LC₅₀, Anoxia, Toluene, H₂S, CO

†Corresponding author:kk3843@yahoo.co.kr

I. 서 론

호흡하는 대기 중에 산소가 부족하거나 유해가스에 노출할 경우 산소결핍에 의한 질식 또는 급성중독에 의한 건강장해 등의 사망사고가 많이 발생되고 있으며 특히 하절기의 경우 습하고 환기가 부족한 경우 미생물의 번식이 쉬워 메탄가스, 황화수소, 일산화탄소 등의 유해가스의 농도가 올라가고 상대적으로 산소농도가 낮아져 산소결핍이나 유해가스에 의해 급성중독이 일어날 가능성이 높아지게 된다. 산업안전보건법에서 산소결핍이라 함은 공기 중의 산소농도가 18% 미만으로, 적정한 공기는 산소 18% 이상, 23.5%미만이지만[1], 최근 동중 재해를 보면 맨홀, 오·폐수 처리장 등 환기가 부족하거나 밀폐 공간 작업장에서 산소결핍 또는 유해가스에 의한 급성중독으로 매년 20여건이 발생하며, 특히 맨홀, 오·폐수처리장, 저장탱크, 선박내부 작업 등에서 많이 발생하며 재해의 50 % 이상이 하절기(6월-9월)에 집중적으로 발생하였다[2].

따라서 이의 사고 예방 일환으로 국내외에서 발생된 관련 각종 사고 사례 및 관련 제도를 조사하여 급성중독 또는 산소결핍에 의한 사고의 원인을 조사하고, 흡입 챔버와 실험동물을 이용 산소농도와 각종 유해가스의 농도에 따른 치사농도를 연구하여 사람에게 미치는 위험성을 예측하여 동중 사고를 예방하고 급성중독이나 관련 사망사고 발생시 원인규명 자료로 활용하고자 하였다.

II. 시험재료 및 연구방법

1. 자료조사 및 시험재료

국내외에서 발생된 관련사고 사례 및 법규와 제도를 조사하였으며, 실험동물을 이용한 산소 및 각종 유해가스의 농도별 치사율 시험은 9주령의 SD rat 수컷을 이용하였다. 이를 위해 온, 습도 조절장치를 통해 정화된 청정공기와 질소가스(N₂, 99.98%), 가스 발생장치(SIBATA Co., Japan)를 이용 톨루엔 증기 발생장치, 그리고 각 시험 농도별 표준 봄베가스의 황화수소(H₂S)와 일산화탄소(CO)를 사용하였으며, 습도 조절은 초음파가습기(오성사, H-557)를 이용하였다.

2. 실험방법

시험물질의 노출시간 및 임상관찰 등 실험방법은 OECD의 시험규정[3]인 OECD guideline for Testing of chemicals : 403 Acute Inhalation Toxicity (2011)에 따라 시험물질 노출시간은 4시간(단, 4시간

노출 전 전량 사망경우 사망시간까지), 그리고 생존 동물에 대해서는 청정사육 환경에서 48시간 임상관찰기간을 가지며 사망 동물의 유무와 임상관찰 하였다.

실험동물 수는 시험물질별 각 40마리로 하여 Photo 1과 같은 흡입챔버(SIBATA Co., Japan) 4대를 이용 실험동물 10마리를 한 군으로 4군을 조성하였으며, 시험농도는 문헌조사문헌조사[8, 9, 10, 14]와 예비시험을 통해 산소, 질소, 유해가스를 일정비율로 조절하여 사망하지 않을 최고이 농도를 저 농도군으로, 고농도군은 100%치사하지 않을 최저농도를 고농도군으로 하고 중간 농도는 가능한 치사율이 다를 수 있는 농도를 예측하여 시험농도를 설정하였다. 산소농도 측정은 Photo 2와 같이 자동시료 포집 및 산소농도 측정 장치를 이용하였으며, 시험물질 노출 전, 후 실험동물의 생사 유무 확인과 활동성 변화를 관찰하기 위해 적외선 감시 장치를 이용 시간별로



Photo 1. Exposure Inhalation chamber.



Photo 2. Automatic gas sampler and the oxygen concentration meter.

실험동물의 운동성과 활동량을 측정하여 적산 기록하였으며, 노출종료 후 생존 동물에 대해서는 48시간의 관찰기간을 가지며 특이적 임상증상 및 사망유·무를 확인하였다. 각 시험군 별 노출농도 측정 결과는 평균과 표준편차로 표시하고, 가스농도와 치사율의 양-반응(Dose-Response)관계는 Sigma-Step 프로그램을 이용하였다.

그리고 실험착수 전 실험동물에 대해 사용동물수의 적정성과 사용방법, 최후 처치방법 등을 산업안전보건연구원의 동물실험윤리위원회 심의를 거쳐 승인을 받은 후 실시하였다.

III. 연구결과

1. 산소농도 변화에 따른 치사율 변화

SD rat 수컷 10마리를 한 군으로 산소농도 변화에 따른 시간별 운동성과 치사율 변화를 시험하였다. 시험결과 흡입챔버 내 산소농도는 시험개시 10분 이내(8-10분)에 시험 목표 농도에 도달하였다. 노출농도 설정은 예비실험 및 문헌조사[8, 9, 10, 14]를 통해 치사하지 않을 최고 산소농도(7-10%), 고농도는 100%치사할 최저 산소농도(4%이하)로 하여 시험하였다. 시험 결과 산소 노출농도와 노출시간별로 실험동물의 운동성 변화는 Fig. 1과 같았으며, 산소결핍시험 개시 초기에는 실험동물의 호흡근관으로 운동성이 크게 증가하였으나 20-30분 후부터는 운동성이 현격히 저하되었고, 사망동물의 경우 일부는 고환의 부종현상도 관찰되었다. 시험농도별 실험동물의 치사율은 Table 1, 산소농도와 치사율의 양-반

응(Dose-Response)은 Fig. 2로 나타나 과반수치사농도 LC₅₀(rat, 4hr)은 5.5%로 산출되었다.

2. 산소결핍 환경에서 톨루엔 노출에 따른 치사율 변화

공기 중 산소 6.01±0.23% 환경에서 톨루엔 복합 노출시 치사농도의 영향 변화를 확인하기 위해 rat 수컷 10마리를 한 군으로 3군을 조성한 뒤 톨루엔은 작업환경 노출기준(50 ppm)하여 극한의 작업 상황을 고려 2배(100 ppm), 10배(500 ppm), 20배(1,000)로 정하였다.

농도별로 각각 노출 시험한 결과 Table 2와 같이

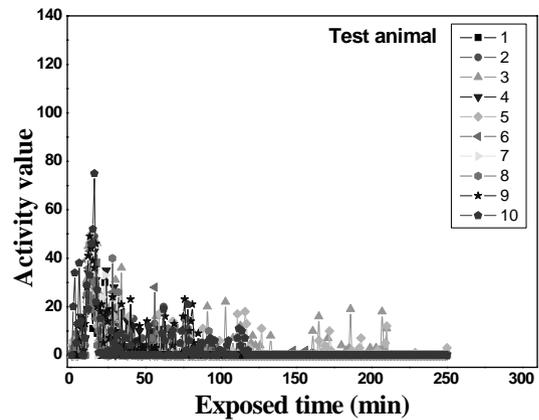


Fig. 1. Change of mobility of rats at the oxygen concentration of 5%.

Table 1. Number of dead animals and lethality according to different oxygen concentrations in each experimental chamber.

O ₂ Expo.	O ₂ (%)	Test ani. No.	Death ani. No.	Death time	Death (%)
4 % group	3.82±0.09	10	10	50 min	100 %
5 % group	4.97±0.26	10	9	230 min	90 %
6 % group	6.24±0.25	10	2	240 min	20 %
7 % group	7.23±0.59	10	0	240 min	0 %

Table 2. Exposure concentration and number of dead animals in experimental chamber with toluene.

Test group	Toluene (ppm)	O ₂ (%)	Test ani. No.	Death No.	Death(%)
100 ppm	102.1±4.1	6.01±0.23	10	2	20 %
500 ppm	481.8±41.0	6.04±0.17	10	2	20 %
1,000 ppm	993.4±33.5	6.01±0.20	10	2	20 %

톨루엔 100 ppm 노출군(102.1±4.1 ppm)의 경우 노출 3-4시간에 2마리 사망하였고(20%치사), 500 ppm군(481.8±41.0 ppm)의 경우 노출시간 3-4시간에 1마리, 노출 종료 후 회복 1시간 후 1마리 사망(20%치사), 1,000 ppm군(993.4±33.5 ppm)의 경우 3-4시간에 2마리 사망(20%치사)하였으며, 생존동물은 48시간 회복기간 중 특이적 증상이나 추가적 사망동물은 없었다.

3. 산소결핍 환경에서 H₂S 노출에 의한 치사율 변화

공기 중 산소 6.01±0.02% 환경에서 H₂S노출에 따른 치사농도 영향을 관찰하기 위해 rat 수컷 10마리를 한 군으로 3군의 시험 군을 조성한 뒤 H₂S 표준 가스를 이용 20, 350, 500 ppm을 노출시켜 치사율을 시험하였다. 노출농도 설정은 예비실험 및 문헌조사 [8, 9, 10, 14]를 통해 치사하지 않을 최고 농도(20 ppm 수준), 고농도는 100%치사할 최저 농도(500 ppm이하)로 하여 시험하였으며, 시험 결과 사망동물 수는 Table 4와 같았다. 시험물질 노출기간 중 사망동물은 20 ppm군의 경우 10마리 중 노출개시 2시간 후부터 4시간까지 4마리 사망(40%), 350 ppm의 경우 노출시작 2시간 50분부터 4시간 노출 종료까지 3마리 사망(30%), 500 ppm의 경우 노출시작 1시간 40분부터 3시간 40분까지 10마리 중 10마리 모두 사망(100%)하였으며, 생존동물에 대해서는 48시간 회복기간을 가졌으나 추가적 사망동물은 없었다.

따라서 본 시험결과 산소결핍(6%) 상황에서 H₂S 20, 350, 500 ppm의 노출은 산소결핍 단일 상황보다 치사율을 상승시키는 효과를 나타내었다.

4. 산소결핍 환경에서 CO 노출에 의한 치사율 변화

공기 중 산소 6.02±0.02% 환경에서 CO 노출에 따른 치사영향을 관찰하기 위해 rat 수컷 10마리를 한 군으로 4군의 시험 군을 구성한 뒤 CO 표준가스를 이용 300, 600, 1,200, 2,400 ppm을 노출시켜 치사율을 시험하였다. 노출농도 설정은 예비실험 및 문헌조사 [8, 9, 10, 14]를 통해 치사하지 않을 최고 농도(300 ppm수준), 고농도는 100%치사할 최저 농도(2,400 ppm이하)로 하여 시험하였으며, 시험한 결과 사망동물 수는 Table 5와 같았다. 시험물질 노출기간 중 사망동물은 300 ppm군의 경우 10마리 중 노출개시 2시간 50분에 1마리 사망(10%), 600 ppm군의 경우 노출시작 후 3시간 16분경 1마리, 3시간 30분경 1마리, 총 2마리 사망(20%)하였고, 1,200 ppm군의 경우 노출시작 58분경 1마리 사망을 시작으로 1시간45분까지 총 10마리 전량 사망(100%)하였으며, 2,400 ppm 경우 50분 이내 10마리 전량 사망(100%)하였으며, 생존동물에 대해 48시간 회복기간을 가졌으나 추가적 사망동물은 없었다.

5. 산소결핍 환경에서 습도변화에 따른 치사율 변화

공기 중 산소 6.24±0.25% 환경에서 습도의 변화에 따른 치사율 변화를 관찰하기 위해 rat 수컷 10마리를 한 군으로 3군을 조성한 뒤 산소결핍 환경에서 상대습도 20, 60, 90 % 변화에 따른 치사율 변화를 시험하였다. 저 습도는 일반적으로 건조시의 상대습도(20%), 고습도는 우기시의 습도(90%)로 정하였으며, 시험한 결과는 Table 5와 같았다.

Table 3. Exposure concentration and number of dead animals in experimental chamber with H₂S.

Test group	H ₂ S (ppm)	O ₂ (%)	Test ani. No.	Death No.	Death(%)
20 ppm	20.15±0.1	6.01±0.02	10	4	40 %
350 ppm	346.5±3.5	6.01±0.00	10	3	30 %
500 ppm	493.5±3.5	6.01±0.01	10	10	100 %

Table 4. Exposure concentration and number of dead animals in experimental chamber with CO.

Test group	CO (ppm)	O ₂ (%)	Test ani. No.	Death No.	Death (%)
300 ppm	298.5±0.5	6.02±0.02	10	1	10 %
600 ppm	601.0±3.0	6.02±0.02	10	2	20 %
1,200 ppm	1,199±11	6.00±0.01	10	10	100 %
2,400 ppm	2,405±15	6.12±0.02	10	10	100 %

Table 5. Exposure concentration and number of dead animals in experimental chamber with humidity.

Test group	Humidity (%)	O2 (%)	Test ani. No.	Death No.	Death(%)
20 % group	25.40±7.50	6.24±0.25	10	2	20 %
60 % group	59.22±10.14	6.14±0.28	10	2	20 %
90 % group	86.41±10.69	6.01±0.18	10	2	20 %

상대습도 20% 군(25.40±7.50%)의 경우 노출 2-3시간에 1마리, 3-4에 1마리 사망하였고(20%치사), 60%군(59.22±10.14%)의 경우 노출시간 2-3시간에 2마리 사망(20%치사), 90%군(86.41±10.69%)의 경우 2-3시간에 1마리, 3-4시간에 1마리 사망(20%치사), 노출 종료 후 생존동물은 48시간 회복기간 중 특이적 증상이나 추가적 사망동물은 없었다.

따라서 산소부족(6%) 상황에서 상대습도 변화에 따른 치사율의 상승효과는 없는 것으로 나타났다.

IV. 고찰

산소결핍이란 산업안전보건법 보건기준에 관한 규칙 제31조에서는 “산소농도가 18% 미만일 경우”로 규정하고 있으며 미국의 산업안전보건청(OSHA, CFR 1910.146)에서는 “산소농도가 19.5% 미만일 경우”를 산소결핍으로, 해수면 높이에서 건조공기에 포함된 산소농도가 23.5% 초과일 때를 산소과잉이라 정의하였다. 그리고 “산소결핍증”이란 산소가 결핍된 공기를 흡입함으로써 생기는 이상증상을 말하며, 이러한 산소결핍의 원인으로는 물질의 산화나 부식, 미생물의 호흡작용, 식물, 곡물, 목재 등의 호흡작용, 작업공간의 공기가 다른 가스로의 치환 등으로 하여 산소가 부족하게 된다. 특히 산소는 무색, 무취의 가스로 냄새나 감각으로는 산소 결핍 현상을 판단할 수 없기 때문에 산소 결핍증으로 인한 재해를 더욱 많이 초래하게 된다. 이와 같은 산소 결핍증에 의한 질식 사고를 막기 위해서는 가스의 측정 및 경보, 환기, 안전위생 교육 등 많은 대책이 확립되어야 하며, 산소 결핍 현상을 유발하는 각종 가스의 성질과 산소 결핍증의 발생 원인을 정확하게 이해하는 것이 중요하다.

최근 산소결핍 또는 유해가스에 의한 급성중독 사고들을 보면 우리나라의 경우 산소결핍 관련 사망 재해는 매년 20여명이 발생하고 있으며, 장소로는 지하 매설 시설 보수, 맨홀작업, 건설현장 밀폐 공간 등 작업 시 산소 결핍 및 질식사고 등으로 '99년부터 '07년간 발생한 재해의 경우 맨홀(28.3%), 오페수처리장(20%), 선박내부(12.8%) 순이었으며, 기인물은 산소

결핍(41.4%), 각종 유해가스 질식(59%)이었으며, 유해가스로는 일산화탄소(36%), 황화수소(19%), 톨루엔 등 유기성 혼합가스(17%), 아르곤, 질소 등 치환가스(11%), 이산화탄소(3%), 아르곤이었으며, 업종별로는 건설업이 41.7%, 제조업이 23.3%, 위생, 서비스업이 12.2%순이었으며, 계절별로는 6월에서 9월에 집중적(52%)으로 발생되었고, 또한 구조작업 중에 사망한 경우도 13.3%로 나타나고 있음이 보고(한국산업안전공단, 2011)되었다.

그리고 산소결핍에 의한 치사농도 실험에서 Toshifumi(1998), Morita(1998) 등 다른 연구결과에서도 동물의 종간에 일부 차이성은 있으나 연구자들마다 개, 고양이, mouse 등 다양한 동물을 사용하였으며, 치사농도는 대개 4-8%(산소)의 결과를 나타내었고, Edward and Dorothy(1921)는 사람에게 있어 100% 치사농도는 밝히지 않았지만 생존할 수 있는 최소 산소량은 약 7%이며 심지어는 5.2%에도 생존가능하다는 연구결과로 볼 때 산소의 치사농도는 대부분 4-8%수준으로 나타나 동물의 종간 차이성이 크지 않은 결과로 해석되었다. 단, 산소결핍 조건에서 온도나 다른 유해가스 등의 복합적인 상황에서의 치사농도는 다르게 나타날 수 있는 것으로 확인되었다.

산소는 상온·상압에서 무색, 무미, 무취의 기체로 자체는 가연성이 아니나 다른 물체의 연소를 돕는 조연성의 물질로 성인은 1분에 0.2-0.3ℓ의 산소를 소비하며, 특히 생체의 장기 중에서 뇌가 가장 많은 산소량을 소비하며 산소의 공급량이 감소하게 되면 뇌의 활동성 저하가 일어나고 무 산소에서 2분이 경과되면 대뇌의 피질세포가 비가역적인 붕괴하고 6-8분 후에는 전신으로 파급되게 되어 사망에 이르게 된다.

저산소증에서는 주로 뇌손상과 호흡기계 이상으로 사망하며, 뇌에서 뇌혈관확장과 부종, 뇌세포손상과 인지능력 저하, 호흡기계에는 말초 화학 수용체들의 자극을 통해 폐혈관수축과 교감신경자극과 같은 즉시형의 순환반응을 자극하고, 교감신경 활성화로 폐혈관 수축과 폐순환내로 혈액이동을 증가시킨다. 그 결과 폐 모세혈관압력이 올라가서 간질세포내로 체액의 누출이 증가하여 폐 부종이 야기되며, 심할 경우

뇌와 폐 기능 손상에 의해 사망에 이른다. 저산소증은 급성 음낭증 유발 및 고환의 부종 현상이 발생하며, 또한 혈액 pH의 저하, 호흡수와 호흡심도, 심박수 평가, 스트레스 관련 호르몬 평가, 뇌와 폐 및 고환의 조직학적 변화 등이 나타난다[4].

본 연구에서도 산소결핍에 의한 rat의 사망동물에서 고환의 부종현상이 확인되었으며 Rassler 등(2007)의 연구[4]와 동일한 현상이 확인 되었다. 인체 중에서 산소 부족에 대하여 가장 민감한 반응을 나타내는 부분은 산소 소비가 가장 많은 뇌이며 산소결핍 시 대뇌피질의 기능저하를 비롯하여, 궁극적으로는 뇌세포 손상에 의한 기능 상실을 거쳐 죽음에 이르게 된다.

중추신경계 또한 산소를 많이(20%정도) 소비하는 장기로 산소가 부족한 경우 대뇌 혈류량을 증가시켜 산소를 공급한다. 그러나 장기간의 저산소증 상태가 되면 뇌간(brainstem), 해마(hippocampus), 대뇌피질(cerebral cortex) 등에 영향을 주게 되고 대뇌의 세포는 그 기능을 억제하게 된다. 심혈관계의 경우 저산소증이 있으면 산소 농도의 감소로 전신혈관이 확장되어 혈압이 감소하는데 저산소증의 초기에는 화학수용체세포에 의해 교감신경이 발달하여 혈압 감소가 보상되지만 저산소증이 지속되면 심박동수의 감소, 심 박출량의 감소로 혈압이 떨어지며 호흡수와 환기량이 증가하게 되고 폐혈관의 수축이 발생하며 장기화 될 경우 폐 고혈압이 발생할 수 있다.

Morita(1998)의 연구에 의하면 N₂, CH₄, N₂O의 가스를 사용한 흡입독성연구에서 실험동물 흰쥐의 호흡 정지는 4%의 O₂와 80%의 가스 농도일 때 일어났으며, 개의 경우 사망농도는 O₂의 농도가 2.0-2.5%에서 전량 치사되었다. 따라서 동물의 치사농도는 동물 개체차에 의해 산소 농도의 차이가 있었으며 동물의 크기나 종의 차이에서도 일어날 수 있는 것으로 확인되었다[5].

작업환경에 따라서는 저 산소가 아니라도 근력저하에 의해 몸을 지지할 수 없거나 어지러움 등에 의한 추락, 전락, 익사 등의 사고가 발생하며, 기능의 저하에 의한 착각, 오동작, 헛디딤, 등의 다른 사고를 유발할 가능성이 매우 높으며, 질식으로 인한 구토의 경우 흉부가 하늘을 향한 상태이면 구토물이 기관지내로 흡입하여 질식사 하는 경우도 있으며, 옆드린 자세로 물이 고여 있는 곳에 쓰러졌을 경우 폐내에 물을 흡입하여 익사한 것과 같은 결과가 되는 사례도 있다[2].

공기 중의 산소 비율은 약 21%로 나타나지만 맨홀, 발효 탱크, 곡물 사일로, 우물, 터널 등 환기가 나쁜 장소에서는 미생물의 호흡이나 토양 중에 포함된 철의

산화현상, 그리고 동물, 식물의 호흡이나 유기물의 부패에 의해서도 산소 농도가 저하되며 금속의 산화에 의한 산소 결핍 현상은 선박, 탱크, 보일러 등 밀폐된 철 구조물에서도 빈번하게 발생한다.

미국의 경우도 산소결핍 재해 다발로 하여 1987년 국립산업안전보건연구원(National Institute for Occupational Safety and Health)에서는 “밀폐공간 안전을 위한 가이드(A Guide To Safety in Confined Space)”를 제정하였으며 이는 밀폐공간과 위험물질을 인식하기 위한 정보 제공을 위해 작업환경측정방법, 환기, 보호구, 대기/구조, 물리적 위험물질, 미끄러운 바닥, 소음에 대한 특별한 지침과 밀폐공간에 들어가기 위한 체크리스트를 제공해준다[6].

또한 1979년 미국 국립산업안전보건연구원(National Institute for Occupational Safety and Health)에서는 권장 기준을 위한 척도로 “밀폐공간에서의 작업(Criteria for a Recommended Standard: Working in Confined Spaces)”를 만들었다. 여기에는 밀폐공간을 3가지(Class A-Immediately Dangerous to Life/Health (IDLH); Class B-dangerous, but not IDLH; Class C-potentially hazardous)로 나누었고 각각의 수준에서 고려해야 할 요인에 대한 체크리스트를 제공하고 밀폐공간에 있는 대기의 측정방법, 안전한 작업을 위한 절차, 보호구와 보호의에 대한 정보를 제공한다[7].

환경별 산소 소모현상을 보면 유기물이 침적된 밀폐 공간인 지하 맨홀이나 분뇨탱크, 폐수 또는 하수 처리설비 등에는 습도와 온도, 유기물의 영양분등으로 미생물의 번식이 쉽다. 예를 들면 사람(Human)의 경우 산소소비량이 200 ml/g/day인 경우 원생동물(Paramecium)은 500, 사상균(Lusarium)은 1,000, 조류(Chlorella)는 40,000, 세균(Azotobacter)은 1,200,000 ml/g/day에 이르며, 이러한 미생물의 증식으로 인해 소모되는 산소 소비량은 온도 및 습도, 영양분(유기물)의 조건에 따라 매우 강력하고 빠르게 진행되며 특히 분뇨나 고농도 유기물의 폐수, 펄프액등은 미생물의 번식이 매우 쉬우며 이로 인해 급격한 산소의 저하와 상대적으로 이산화탄소, 황화수소, 메탄 가스 등이 많이 발생되며 환기가 부족한 경우 저산소, 고농도의 질식가스의 위험한 환경이 된다.

실험동물을 이용한 각종 산소결핍 연구 자료를 보면 Toshifumi(1998)는 프레온-22에 의한 질식시험에서는 부자유한 걸음(reeling)과 행동은 프레온 -22 10%, 산소 18%에서, 쓰러짐은 프레온-22 15-20%, 산소 16-17%, 달리기 등의 몸통과 사지의 폭력적 행동과 입과 코에서 맑은 점액이 프레온-22 20%에서 나타났고 호흡정지는 프레온-22 30-35%, 산소 13-14%에서, 가스

농도를 80% 산소농도를 20%로 혼합한 경우 심장 정지에 의한 사망에 이르렀다고 보고하였다[8].

Ikeda(1990)는 25마리의 개(dog)를 톨루엔 2ml와 공기가 혼합된 플라스틱 함에 넣고 호흡 및 행동을 관찰한 결과 호흡운동은 0.5-1.5분까지 변화가 없다가 호흡율과 호흡운동이 서서히 증가하여 최고점에 이르고 수분동안 지속되다 천천히 내려가는 결과를 보였으며, 호흡운동은 실험시작 후 9-10분간 지속되었는데 호흡이 정지하고 나서 1-2 분 후에 심장 정지가 되었고 실험을 하는 동안 플라스틱 백 안의 톨루엔의 농도는 3%였다고 보고 하였으며[9], Suzuki(1996)는 비 폐쇄성 질식과 관련된 연구를 하였는데 산소 결핍과 같은 상황을 만들기 위해 순수 질소 또는 낮은 농도의 산소와 질소의 혼합가스가 들어 있는 플라스틱 탱크를 만들고 여기에 개(dog)를 넣어 실험하였다. 순수한 질소가스 또는 1% 산소와 질소가스의 혼합에서는 호흡곤란이 30초 내에 발생했으며 호흡운동은 1분 내에 최고조에 달하고, 2분 내에 멈추는 결과를 가져왔다. 그리고 2.2%산소와 질소의 혼합가스를 가지고 실험한 결과 3마리 중 2마리가 10분 내에 사망하였다고 보고하였고[10], Rassler(2007) 등은 46마리의 SD rats를 질소와 10% 산소로 구성된 챔버에 넣고 시간별(6, 8, 16, 24, 72, 168시간)로 관찰결과 저 산소 상태에 168시간 노출된 군에서 좌심실 수축압(LVSP: LV systolic pressure)과 심방이완압력(DAP: diastolic atrial pressure)은 각각 23%, 27% 높게 나타났으며, 총 말초저항(TPR: total peripheral resistance)은 대조군에 비해 200배 이상 높게 나타났다. 그러나 저산소증에 의해 심근비대의 소견은 없었다. 또한 폐 부종은 천천히 나타나다가 저산소증에 16시간 노출된 후 최고치를 이루었다고 보고하였다[4].

이와 다르게 이산화탄소의 경우는 농도를 증가시키면 동맥혈 이산화탄소의 분압(Paco 2)이 증가하게 되고 이때 화학 감수기는 동맥혈 이산화탄소 분압(Paco 2)의 증가를 호흡중추에 전달하고 호흡중추는 보상기전으로 환기량을 늘여 필요한 산소를 공급하게 해서 저산소하에서도 생존이 가능한 것으로 판단되었으며, 이의 관련 연구로 하여 김우겸(1988)은 이산화탄소의 농도 변화와 환기 량과의 관계를 연구하였는데 5% CO₂를 혼합한 공기로 호흡한 생체의 환기량은 3-4배 늘어났으며, 15% CO₂에서는 100L/min으로 최대 환기량에 도달했다고 하였으며[11], 또한 Hill & Flack(1998)은 개와 고양이를 대상으로 한 실험에서 CO₂ 농도가 35%가 될 때까지는 호흡과 혈액 순환을 증가시키는 영향을 주지만 35% 이상이 되면 호흡과 혈액 순환을 감소시키는 역할을 한다고 하였다[12]. 동물실험과 별도로 사람을 대상으로 한 연구

결과도 있었는데 오래된 자료이지만 Edward and Dorothy(1921)는 사람에 있어 100% 치사농도는 밝히지 않았지만 생존할 수 있는 최소 산소량은 약 7%이며 심지어는 5.2%에도 생존가능하다는 연구결과[13] 등으로 볼 때 산소의 치사농도는 대부분 4-8%수준으로 나타나 동물의 중간 차이성 보다는 유해물질의 종류 및 환경에 따라 치사농도가 크게 달라지는 것으로[14] 해석되었다.

V. 결론

'99년부터 '07년간 발생한 재해의 경우 맨홀(28.3%), 오페수처리장(20%), 선박내 부(12.8%) 순이었으며, 기인물은 산소결핍(41.4%), 각종 유해가스 질식(59%)이었으며, 유해가스로는 일산화탄소(36%), 황화수소(19%), 톨루엔 등 유기성 혼합가스(17%), 아르곤, 질소 등 치환가스(11%), 이산화탄소(3%), 아르곤이었고, 업종별로는 건설업이 41.7%, 제조업이 23.3%, 위생, 서비스업이 12.2%순이었으며, 계절별로는 6월에서 9월에 집중적(52%)으로 발생되었고, 또한 구조작업 중에 사망한 경우도 13.3%로 나타났다.

SD rat를 이용 4시간 노출에 의한 산소의 치사농도는 산소 6%에서 치사율이 20%, 5%에는 90%, 4%에서는 100%의 치사율을 보였으며, 양-반응(Dose-Response)에 의한 산소의

반수치사농도 LC₅₀(rat, 4hr)는 5.5%로 산출되었다.

또한 산소부족(6%) 상황에서 톨루엔, H₂S, CO, 습도 등 환경조건 변화에 따른 치사율실험결과 H₂S와 CO는 낮은 농도에서도 생체의 민감도가 높았으며, H₂S의 경우 350 ppm에서 30%치사, CO는 1,200 ppm에서 100%치사되는 등 산소 6% 상황에서 치사율에 상승작용의 결과를 보였다. 그러나 톨루엔의 경우 1,000 ppm까지는 치사율에 있어 상승작용을 나타내지 않았으며 습도의 경우도 20% 또는 90%에서도 치사율에 상승효과를 나타내지 않았다.

참고문헌

- [1] Ministry of Employment and Labor. Occupational Safety and Health statute book, (2012)
- [2] Korea Occupational Safety and Health Agency, Institute for Occupational Safety and Health, Industrial Accident Analysis Report, (2011)
- [3] OECD. Guideline for Testing of chemicals : 403 Acute Inhalation Toxicity, (2011)
- [4] Rassler B, Marx G, Reissig C, Rohling MA, Tan-napfel A, Wenger RH, Zimmer HG.. Time cour-

- se of hypoxia-induced lung injury in rats. *Respir Physiol Neurobiol.* Oct 15;159(1), 45-54, (2007).
- [5] Morita Masahiko, Toshifumi WstanabeJacopo. *Forensic Science International* 96, 45-59, (1999)
- [6] NIOSH. A Guide To Safety in Confined Space. National Institute for Occupational Safety and Health(NIOSH), (1997)
- [7] NIOSH, Criteria for a Recommended Standard: Working in Confined Spaces. National Institute for Occupational Safety and Health(NIOSH), (1997)
- [8] Toshifumi Watanabe, Masahiko Morita.(1998). Asphyxia due to oxygen deficiency by gaseous substances. *Forensic Science International.* 96, 47-59, (1998)
- [9] N. Ikeda, D. Mei, H. Takahashi and T. Suzuki. The course of respiration and circulation in death due to oxygen deficiency. *Res. Pract. Forensic Med.*, 32, 135-139, (1989)
- [10] Suzuki T. Suffocation and related problems. *Forensic Science International*, 80: 71-78, (1996)
- [11] WG Kim. Respiratory Physiology. Publishing Principles of Life, 125-127, (2006)
- [12] Hill L, Flack M., The effect of excess of carbon dioxide and of want of oxygen upon the respiration and the circulation. *J Physiol.* 30;37(2), 77-111, (1998)
- [13] 3. Edward C.S. and Dorothy T., A study of low oxygen effects during rebreathing. *Am. J. Physiol.* (55), 223-257, (1921)
- [14] H Goto, M Ikeda et al., List all used industrial poisoning, 102-104., 543-544, (1994)