

보건분야-연구자료
연구원 2008-128-1455

산소 농도와 유해가스 등 작업환경이 생체 및 운동성에 미치는 영향 연구

김현영, 이성배, 한정희, 강민구, 예병진



한국산업안전공단
산업안전보건연구원

요 약 문

1. 연구목적 및 필요성

맨홀 내 작업이나 정화조 등 환기가 부족한 작업환경에서 산소결핍에 의한 질식 또는 유해가스 중독으로 인하여 최근 5년간 매년 10여건의 사망사고가 다발(2007년 경우 31명)하고 있어 이의 예방대책이 시급한 상황에 있으며, 특히 이러한 사고 중 일부는 산소결핍(18%이하)의 치사농도 이상에서도 사망사고가 발생하고 있어 이의 원인규명 필요성이 제기되고 있다. 따라서 본 연구에서는 산소결핍 재해예방을 위한 외국의 제도 및 사고 사례를 분석하고 실험동물을 이용 산소농도의 저하와 유해가스 등 다른 환경변화에 따른 사망 또는 생체에 미치는 영향을 규명하기 위하여 산소농도의 변화에 따른 치사농도 규명과 산소결핍상황에서 유해가스(휘발성유기화합물, H₂S, CO, CO₂ 등)와 고온, 다습의 환경적 요인이 생체에 미치는 영향을 규명하고 이를 통한 동종재해의 사고 예방을 위한 작업환경 관리방안 및 재해발생시 원인규명의 자료로 활용하고자 하였다.

2. 연구내용 및 방법

- 가. 국내외 산소결핍사고 사례분석 및 외국의 관리제도 조사
- 나. 사고의 원인 분석과 산업안전보건법을 포함한 예방대책 제안
- 다. 산소결핍 시험장치 및 유해가스와 노출환경 농도모니터링 장치 제작
- 라. 실험동물을 이용 유해가스(톨루엔, H₂S, CO, CO₂ 등)와 환경(고온, 다습)의 변화에 따른 생체의 영향 및 각각의 치사농도(%) 확인
- 마. 산소 부족상황에서 유해가스(톨루엔, H₂S, CO, CO₂ 등) 노출 및 온, 습도

변화에 따른 생체영향(치사포함)과 운동성의 변화 확인

바. 환경별 노출농도에 따른 치사 및 운동성의 영향과 재해감소 방안 제안

3. 연구결과

가. 국내외적으로 동종 재해는 6-8월에 전체의 50% 발생하며 업종은 건설업에서 40%, 장소는 맨홀 50%, 원인은 산소결핍이 가장 많았으며(40%), 기타 가스(H₂S, CO, 질소, 아르곤 등) 및 환경적 요인(내부 온도, 바닥 물 익사, 구토 물에 의한 기도 막힘)도 크게 작용하는 것으로 나타났으며, 특히 사망자 중 산소결핍 재해예방 교육 이수자 매우 미흡(3%수준)한 실정으로 나타나 교육대상 및 시기, 범위 등에 대한 고려가 필요하였다.

나. 사고원인은 작업 공간 내 환기 부족으로 산소결핍 또는 유독가스 급성중독이었으며, 안전작업 교육 미흡으로 대처능력 부족과 밀폐 공간 내 환경측정 없음으로 산소농도 또는 유해가스의 상황인식이 불가하였으며 특히 산소결핍 상황이나 N₂, CO₂, 아르곤, 메탄가스 등은 무색, 무취, 무감각에 따른 심각한 위험성 감지 불가하였으며, 비상시 응급조치 및 대응방법의 미흡에 대한 개선이 필요하였다.

다. 산소결핍 규제는 한국과 일본은 “산소 18 %이하”, 미국 “19.5 %이하”, 캐나다 “18.5 %이하”, 영국과 호주의 경우 “산소 부족으로 야기될 수 있는 환경” 또는 “밀폐 또는 위험장소” 로 규정하고 있어, 우리나라의 경우도 사고다발의 동종재해 예방을 위해 규제기준의 강화를 통한 산소결핍 장소의 경각심 고취와 산소결핍 위험작업 및 교육 대상 범위의 확대를 고려할 필요가 있을 것으로 사료된다.

라. SD rat를 이용한 치사농도 규명시험 결과 산소결핍의 치사농도는 5 %수준이었으며 양-반응(Dose-Response)관계에 의한 산소의 과반수치사농도 LC50(rat, 4hr)는 5.5 %로 산출되었으며, 산소결핍(6%) 상황에서 온도, 습도, 톨루엔, CO₂, H₂S, CO 등 환경조건 변화실험에서 H₂S, CO 등 유해가스의 농도와 온도의 상승에 따른 치사 또는 생체의 민감도가 가장 높았고, 산소결핍(산소 6%) 상황에서 치사농도는 톨루엔의 경우 1,000 ppm에서 20% 치사, H₂S의 경우 350 ppm에서 30%치사, CO는 600 ppm는 20%치사, 그러나 CO₂의 경우 8%에서도 사망예가 없었다.

4. 활용 및 기대효과

- 가. 국내외 사고사례 및 관련법규의 분석을 통한 재해예방대책 자료제공
- 나. 실험동물을 이용 산소농도에 따른 치사율 규명과 각종 유해가스의 영향 평가 자료 제공
- 다. 산소결핍 상황에서 각종 유해가스(톨루엔, CO₂, H₂S, CO 등) 및 고온, 다습 환경이 생체 및 운동성에 미치는 영향규명
- 라. 산소결핍 우려장소의 작업환경 관리 및 재해발생시 원인분석 자료 활용
- 마. 산소결핍 재해 예방을 위한 작업환경 관리방안 및 동종재해 예방을 위한 산소결핍 재해예방 교육자료 제공

5. 중심어

산소결핍, 밀폐 공간, 질식재해, 중대재해, 치사농도

차 례

I. 서 론	1
II. 연구재료 및 방법	5
1. 국내·외 산소결핍 재해 예방제도 및 사고사례 조사	5
1) 국내·외 산소결핍 재해예방 제도조사	5
2) 국내·외 산소결핍 사례조사 및 분석	5
2. 실험재료	5
1) 시험물질 및 노출방법과 노출농도 설정	5
2) 실험동물 및 사육환경	6
3) 실험방법	7
(1) 산소농도에 따른 임상증상 및 운동성 영향	7
(2) 산소결핍 환경에서 톨루엔 노출에 따른 임상증상 및 운동성 영향	8
(3) 산소결핍 환경에서 습도변화에 따른 임상증상 및 운동성 영향	8
(4) 산소결핍 환경에서 온도변화에 따른 임상증상 및 운동성 영향	9
(5) 산소결핍 환경에서 이산화탄소에 따른 임상증상 및 운동성 영향	9
(6) 산소결핍 환경에서 황화수소에 따른 임상증상 및 운동성 영향	10
(7) 산소결핍 환경에서 일산화탄소에 따른 임상 및 운동성 영향	10
(8) 실험동물의 사망 유·무 및 임상관찰	11
(9) 운동성 변화 측정	11
3. 통계처리	14

III. 연구 결과	15
1. 국내·외 산소결핍 재해 예방제도 및 사고사례 조사	15
1) 국내·외 산소결핍 재해예방 제도조사	15
(1) 한국	15
(2) 미국	15
(3) 일본	16
(4) 영국	16
(5) 캐나다	16
(6) 호주	17
2) 국내·외 산소결핍 사고사례 조사 및 분석	18
(1) 국내 사고사례 조사 및 분석	18
(2) 외국의 산소결핍 사고사례 조사 및 분석	24
가) 미국	24
나) 일본	28
다) 호주	30
2. 산소결핍의 원인분석 및 예방대책	30
1) 산소결핍 위험작업의 종류	30
2) 산소결핍 사고의 원인분석	31
3) 산소결핍 작업의 재해 예방대책	32
3. Rat를 이용 산소결핍과 환경조건 변화에 따른 생체영향 규명	36
1) 산소농도 변화에 따른 치사 및 운동성 영향 시험결과	36
2) 산소결핍 환경에서 톨루엔 노출에 따른 임상 및 운동성 영향	45
3) 산소결핍 환경에서 습도변화에 따른 임상 및 운동성 영향	48
4) 산소결핍 환경에서 온도변화에 따른 임상증상 및 운동성 영향	49
5) 산소결핍 환경에서 CO ₂ 노출에 의한 임상증상 및 운동성 영향	52

6) 산소결핍 환경에서 H ₂ S 노출에 의한 임상증상 및 운동성 영향	54
7) 산소결핍 환경에서 CO 노출에 의한 임상증상 및 운동성 영향	58
IV. 고 찰	62
V. 결 론	77
VI. 참 고 문 헌	79
(Abstracts)	85
VII. Appendixes	89

<표 차례>

<Table 1> 산소농도 측정기에 따른 공기 중 산소농도 측정 결과 13

<Table 2> 최근 5년간 산소결핍에 의한 사망사고 18

<Table 3> Causes of asphyxiation and poisoning in death
 investigations in the OSHA 25

<Table 4> Fatal occupational injuries by selected characteristics 27

<Table 5> Fatal occupational injuries by event or exposure and major
 private industry division, All United States, 2006 28

<Table 6> 일본의 산소결핍증 및 황화수소 중독 재해발생현황 29

<Table 7> 시험군별 챔버 내 공기 중 산소농도 측정결과 37

<Table 8> 시험군별 챔버 내 산소농도에 따른 사망동물 수와 치사율 44

<Table 9> 톨루엔 시험군별 챔버 내 노출 농도와 사망동물 수 46

<Table 10> 습도 시험군별 챔버 내 노출 농도와 사망동물 수 48

<Table 11> 온도 시험군별 챔버 내 노출 농도와 사망동물 수 49

<Table 12> CO₂ 노출 시험군별 챔버 내 노출 농도와 사망동물 수 52

<Table 13> H₂S 노출 시험군별 챔버 내 노출농도와 사망동물 수 55

<Table 14> CO 노출 시험군별 챔버 내 노출 농도와 사망동물 수 59

<Table 15> 일반 대기의 공기 조성 64

<Table 16> Confined space classification table 66

<Table 17> Checklist of consideration for entry, working in and exiting
 confined space 67

<Table 18> 생체의 종류별 산소 소비량 비교 68

<Table 19> 시험물질별 조성과 농도 69

<Table 20> 산소농도에 따른 생체 영향(OSHA & NIOSH, 2006) 71

<Table 21> 이산화탄소의 농도에 따른 생리적 효과	72
<Table 22> 황화수소(H ₂ S)농도에 따른 생리적 효과	72
<Table 23> 일산화탄소에 의한 농도별 생리적 효과	73

<사진 차례>

[사진 1] 흡입챔버를 이용한 시험물질 노출시험 전경 7

[사진 2] 시험물질 노출과 실험동물의 운동성 측정 전경 12

[사진 3] 자동 sampling 및 산소농도 측정기 13

[사진 4] 산소측정 검지관과 검지기, 시료 포집용 테프론 봉투 14

[사진 5] 오수 처리장 지하실 질식사고 사례 현장 20

[사진 6] 불 한증막 일산화탄소 중독사례 현장 21

[사진 7] 음식물 쓰레기투입구 질식사고 사례 현장 23

[사진 8] 산소결핍 사망 수컷 rat 고환의 부종현상 43

<그림 차례>

[그림 1] 노출시간에 따른 각 시험군 별 챔버 내 산소농도	37
[그림 2] 산소농도 4%수준에서의 시간 경과별 rat의 운동성 변화	38
[그림 3] 산소농도 5%수준에서의 시간 경과별 rat의 운동성 변화	39
[그림 4] 산소농도 6%수준에서의 시간 경과별 rat의 운동성 변화	41
[그림 5] 산소농도 7%수준에서의 시간 경과별 rat의 운동성 변화	42
[그림 6] rat의 산소농도와 치사율의 양-반응(Dose-Response) 관계	44
[그림 7] 노출 시간별 흡입챔버 내 톨루엔 농도 변화	46
[그림 8] 톨루엔 1,000 ppm군의 노출시간 경과별 rat의 운동성 변화	47
[그림 9] 20℃ 노출군의 노출시간 경과별 rat의 운동성 변화	50
[그림 10] 30℃ 노출군의 노출시간 경과별 rat의 운동성 변화	51
[그림 11] 40℃ 노출군의 노출시간 경과별 rat의 운동성 변화	51
[그림 12] CO ₂ 2% 노출군의 노출시간 경과별 rat의 운동성 변화	53
[그림 13] H ₂ S 20 ppm 노출군의 노출시간별 rat의 운동성 변화	56
[그림 14] H ₂ S 100 ppm 노출군의 노출시간별 rat의 운동성 변화	57
[그림 15] H ₂ S 350 ppm 노출군의 노출시간별 rat의 운동성 변화	57
[그림 16] H ₂ S 500 ppm 노출군의 노출시간별 rat의 운동성 변화	58
[그림 17] CO 300 ppm 노출군의 노출시간별 rat의 운동성 변화	60
[그림 18] CO 1,200 ppm 노출군의 노출시간별 rat의 운동성 변화	60
[그림 19] CO 2,400 ppm 노출군의 노출시간별 rat의 운동성 변화	61

I. 서 론

산업현장에는 다양한 위험기계기구 및 유해 화학물질의 취급 등으로 매년 많은 산업재해가 발생하며 이들 중 맨홀, 오·폐수 처리장 등 환기가 부족하거나 밀폐 공간 작업장에서 산소결핍으로 인한 급성중독의 사고사례도 매년 10여건, 20여명의 중대재해가(2007년도 19건 발생, 31명 사망, 7명 부상) 지속적으로 발생되고 있으며, 특히 맨홀, 오·폐수처리장, 저장탱크, 선박내부 작업, 배관작업장 등에서 동종 재해가 발생하고 있으며, 재해의 50% 이상이 하절기(6월-9월)에 집중적으로 발생하여(한국산업안전공단, 2008) 정부에서는 이에 대한 원인규명 및 재발 방지와 산소결핍 장소에서의 무재해 실현을 위한 운동을 전개하고 있으며, 동종재해 예방을 위해 “지하맨홀 작업 사전신고제 도입” 등 산소결핍 사망재해 예방에 대한 대책을 강구하고 있다(노동부, 2007).

산업안전보건법에서 산소결핍이라 함은 공기 중의 산소농도가 18% 미만으로, 적절한 공기는 산소 18%이상, 23.5%미만, 탄산가스 1.5%미만, 황화수소 10 ppm미만 수준의 공기로 규정하고 있다. 또한 밀폐공간이라 함은 산소결핍, 유해가스로 인한 화재·폭발 등의 위험이 있는 장소로 물이 통하지 않는 지층에 접하거나 통하는 우물, 맨홀, 핏트 내부, 장기간 밀폐된 산화하기 쉬운 밀폐 공간, 산소를 흡수하는 저장시설, 곡물 저장시설, 발효시설, 내부부패 탱크, 가스 저장탱크, 산소농도가 18%미만 또는 23.5%이상, 탄산가스농도가 1.5% 이상, 황화수소 10 ppm이상의 장소, 콘크리트 양생장소, 반응탱크 등이 있다.

산소 결핍사고의 원인으로 산소는 무색, 무취의 가스로 사람의 감각으로는 산소 결핍 현상을 판단할 수 없기 때문에 대부분 위험상황을 예상 못하는 작업환경으로 인해 사망에 까지 이르는 중대 사고로 발생하는 사례가 많다. 즉, 산소

결핍의 사망사고 상황은 대부분 작업환경이 상온, 상압의 무색, 무취로 하여 냄새가 없으며 폭발이나 화재의 위험성이 감지되지 않아 일반 유독성가스 취급 장소에 비해 안전하다는 생각에 충분한 주의를 기울이지 않고 무의식적으로 접근하는 경향이 높고, 평소 산소 결핍의 상황이 생명에 치명적 영향을 준다는 안전교육의 미비 등으로 중대는 더욱 가중되고 있다.

사고사례 조사 결과에서도 휘발성 유기용제 가스나 황화수소, 메르캅탄 가스 등 냄새가 나는 유독성가스에 의한 사망보다는 질소 가스나 아르곤, 이산화탄소, 일산화탄소 등 무색, 무취의 가스들로 독성이 없는 물질로 착각할 수 있으나 작업 공간 내 이들의 분포가 높을 경우 상대적으로 산소의 농도가 적어 산소 결핍에 의한 저산소성 혈액공급으로 인해 뇌세포의 파괴 및 괴사의 과정을 거쳐 정신장애, 운동성 불가, 의식불명 등을 통해 질식사 할 경향이 높은 것을 알 수 있다. 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.

산소는 상온·상압에서 무색, 무미, 무취의 기체로 산소부족 상태의 생체에 미치는 영향으로는 유산의 생성량이 증대하므로 혈액은 산성으로 변하며 이에 따라 호흡기 및 중추신경 등이 자극되어 호흡심도, 호흡수, 심장박동수의 증가가 일어나게 된다. 인체 중에서 산소 부족에 대하여 가장 민감한 반응을 나타내는 부분은 최대의 산소 소비기관인 뇌이며, 특히 대뇌의 피질이다. 산소 결핍증의 증상은 대뇌피질의 기능저하를 비롯하여, 궁극적으로는 뇌세포 손상에 의한 기능 상실을 거쳐 사망에 이르게 된다.

산소결핍에 의한 영향 연구에 있어 Edward and Dorothy(1921)는 사람이 생존할 수 있는 최소 산소량은 약 7%이며 심지어는 5.2%에도 생존가능하다고 밝혔으나 100% 치사의 사망 산소농도는 제시하지 않았다(Edward and Dorothy, 1921). 또한 마우스를 이용한 동물실험에서 Blackstone는 대기 온도 23°C에서

관찰한 9마리의 C57BL/6J mice는 9마리 모두 5% oxygen 농도에서 15분 이상 생존하지 못했다는 결과를 보고(Blackstone, 2007)하였으며, Toshifumi(1998)는 rat를 이용 각 시험 그룹 당 5마리를 사용하여 대기 중 산소 결핍상황의 흡입 챔버 내에 다른 가스(프레온, 프로판, N₂O, CH₄, CO₂, N₂)를 노출시켜 질식의 과정을 관찰하고 호흡정지의 시간을 관찰하였다. 결과 산소 20%, 프로판, CH₄ 가스 80%의 경우 30-40초 후 호흡이 멈췄으며, 2-3분후에 사망하였으며, 질소 가스(N₂)에 의한 질식에서는 격렬한 점프(도피행위로 추정되는)를 관찰하였고 산소 농도 7%에서 쓰러졌으며 호흡정지는 산소 농도 4%, N₂농도 96%에서 발생하였다. 또한 CO₂를 이용한 실험에서는 호흡율과 환기(ventilation)정도가 CO₂농도 5%에서 증가하기 시작했으며 45-50%에서 몸을 웅크리고 있었으며 60-67%에서 19-23분에 호흡정지가 관찰되었다. N₂O 와 메탄에 의한 질식은 거의 같은 증상을 보였는데 30%에서 불안정성이 나타났고 50%에서 몸을 웅크리고 쓰러졌으며 호흡정지는 N₂O 와 CH₄ 농도 80%, 산소농도 4%에서 나타났다.

프로판에 의한 질식에서는 불안정성이 프로판 40%, 산소 12%에서, 쓰러짐이 프로판 50%, 산소 10%에서, 발작이 프로판 70%, 산소 6%에서 나타났고 호흡정지는 프로판 80%, 산소 4%에서 나타났다(Toshifumi, 1998). 이러한 산소결핍에서 나타나는 영향들은 주로 뇌손상과 호흡기계 이상으로 사망하며, 뇌에서는 저산소증에 대한 반응으로 뇌혈관확장과 부종, 뇌세포손상과 인지능력 저하, 호흡기계에는 말초 화학 수용체의 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 고환의 부종 또는 급성 음낭증의 유발과 뇌와 폐기능 손상에 의해 사망에 이른다는 연구보고(Rassler 등, 2007) 들이 있으며, 이와 같은 산소 결핍증에 의한 사고를 예방하기 위해서는 산소 결핍 환경의 예방, 작업의 경우 사전에 환경의 측정 환기 등

의 조치와 안전교육 등 많은 대책이 확립되어야 하며, 산소 결핍 현상을 유발하는 각종 가스의 성질과 환경의 관련성을 규명하여 산소 결핍증의 발생 원인을 정확하게 이해하여 대책을 강구하는 것이 중요하다.

따라서 본 연구에서는 이러한 산소결핍으로 인한 사망재해의 예방을 위해 최근 국내외에서 발생한 다양한 사고의 원인들을 조사하고 분석하며, 각국의 산소결핍 재해예방을 위한 제도비교를 통한 산소결핍 재해 예방을 위한 작업환경 관리방법, 그리고 동물실험을 이용 산소결핍 및 각종 환경 조건에 따른 생체에 미치는 영향을 조사하기 위해 “산소농도와 유해가스 등 작업환경이 생체 및 운동성에 미치는 영향 연구”를 통하여 산소농도의 변화에 따른 치사농도의 규명과 산소 결핍상황에서 유해가스(휘발성 유기화합물, H₂S, CO₂, CO 등), 고온, 다습의 환경적 요인의 영향을 연구하여 생체의 영향 및 작업환경 관리방안을 제시하고 재해발생시 원인규명의 자료로 활용하고자 하였다.

II. 연구재료 및 방법

1. 국내·외 산소결핍 재해 예방제도 및 사고사례 조사

1) 국내·외 산소결핍 재해예방 제도조사

우리나라 산업안전보건법을 비롯한 미국, 영국, 일본, 캐나다, 호주 등 선진국의 재해예방관련 법과 제도를 조사하고 이를 통하여 우리나라 제도와의 차이점을 분석하고 재해예방을 위한 개선의 필요성 부분을 도출한다.

2) 국내·외 산소결핍 사례조사 및 분석

우리나라를 포함 미국, 일본, 호주 등 선진국에서의 산소결핍 재해발생 등 최근 동종 재해사례를 조사, 분석하여 재해사례의 원인과 특징들을 열거하고 이를 통하여 동종재해 예방을 위한 개선의 필요성 부분을 도출한다.

2. 실험재료

1) 시험물질 및 노출방법과 노출농도 설정

시험물질은 HEPA filter 및 온, 습도 조절장치를 통해 정화된 청정공기와 질소(N_2 , 99.98%), 이산화탄소(CO_2 , 99.81%), 황화수소(H_2S , 99.78%), 일산화탄소(CO 99.89%), 가스발생장치(SIBATA Co., Japan)를 이용한 톨루엔(99.92%)을 이용 톨루엔 증기를 사용하였으며, 온·습도 환경변화는 초음파가습기(오성사, H-557) 및 전열기(한일금속주식회사, CER 2.0)를 이용하였다. 특히 흡입챔버

내 산소농도 조절은 봄베(14 Kg/cm²)의 고압질소 가스와 청정공기 공급장치(ICS-20GR, SIBATA Co., Japan)을 이용 청정공기와 질소가스를 일정비율로 혼합하여 사용목표의 농도로 조절하여 실험동물에 전신노출 하였으며 노출 농도설정은 단시간노출기준(STEL) 농도와 예상 치사농도, 산소결핍시험 관련 참고문헌 등을 토대로 저, 중, 고농도로 설정하였다.

2) 실험동물 및 사육환경

본 연구에 사용된 실험동물은 흡입챔버(SIBATA Co., Japan)내 개별케이지에 수용 및 취급이 용이하고 가격이 저렴하며, 미생물 또는 세균에 의한 감염성 병원체 등 특정병원체 부재(specific pathogen free, SPF) 동물이며 임상소건의 기초 자료가 풍부하여 일반 독성시험에서 많이 사용되는 SD rat를 실험동물로 선택하였다. 실험동물은 오리엔트바이오(주)에서 생산된 수컷 동물로 9주령의 rat(체중 382 - 450 g)를 구입하여 검역 및 1주일간 순화 후 건강한 동물을 시험 군별 체중 편차가 최소화 되도록 분리하여 5연식 스테인레스 철망케이지에 개체별로 수용하였다. 또한 청정사육시설(barrier system)에 설치된 흡입챔버(inhalation chamber)에서 각각의 시험조건에 따라 실험동물에 공기 및 질소가스, 그리고 유해가스 및 온, 습도 등을 변화시키며 각 시험 군별 수컷 10마리로 하여 실험동물에 시험물질을 노출시켰으며 노출군의 영향 평가는 대조군을 기준하였다.

실험동물 도입 및 순화기간, 시험물질 노출 후 48시간 임상관찰기간 중 사육환경은 온도 21-24℃, 상대습도 40-60%, 조명 150~300 Lux로 12시간 점등 및 소등 하였고, 사료는 실험동물용 멸균사료 LabDiet 5002(PMI Nutrition, USA)를, 식수는 상수도수를 삼투압정수 및 자외선 멸균 처리한 음용수를 자유롭게 섭취토록 하였다. 단, 시험물질 노출 중에는 사료를 공급하지 않았다.

3) 실험방법

(1) 산소농도에 따른 임상증상 및 운동성 영향

각 시험농도 군별 흡입챔버(SIBATA Co., Japan) 내 수컷 SD rat 10마리를 한 군으로 하고 산소결핍 연구관련 문헌조사 및 예비시험을 통해 치사 가능 산소농도를 구한 후 이를 기초로 HEPA filter 및 온, 습도 조절장치를 통해 정화된 사육실내 청정공기와 질소표준가스를 이용 사진 1과 같이 흡입챔버 내에 공급하며(150 L/min 수준) 각 시험군 별 산소농도를 4, 5, 6, 7%의 환경으로 4시간 노출시키며 실험동물의 운동 및 호흡상태, 치사여부 등의 임상증상 확인과 운동능력 측정 장치(activity monitoring system; SIBATA, Japan)를 이용 실험동물의 운동성 변화를 측정하였다. 또한 시험물질 노출기간 중 산소농도 측정기(Illinois instrument Co., USA)를 이용 3분에 1회 자동모니터링 되게 하였으며, 4시간 노출 종료 후 48시간 관찰기간을 가지며 체중의 변화 및 특이적 임상 및 사망 유·무를 관찰하였다.



[사진 1] 흡입챔버를 이용한 시험물질 노출시험 전경

(2) 산소결핍 환경에서 톨루엔 노출에 따른 임상증상 및 운동성 영향
각 시험농도 군별 흡입챔버(SIBATA Co., Japan) 내 수컷 SD rat 10마리를 한
군으로 하고 HEPA filter 및 온, 습도 조절장치를 통해 정화된 사육실내 청정
공기와 질소표준가스를 이용 흡입챔버 내에 공급하며(150 L/min 수준) 각 시험
군별 산소농도를 6%(질소 94%)의 환경으로 만들고, 그 산소 결핍상황에서 가
스발생장치(VG-4R, SIBATA Co., LTD, Japan)를 이용 톨루엔을 기화시킨 후
시험 군별 톨루엔(TWA 50 ppm, STEL 150 ppm) 농도를 100, 500, 1,000 ppm
으로 각각 4시간 노출시키며 실험동물의 운동 및 호흡상태, 치사여부 등의 임
상증상 확인과 운동능력 측정 장치(activity monitoring system; SIBATA,
Japan)를 이용 실험동물의 운동성 변화를 측정하였다. 또한 시험물질 노출기간
중 산소농도는 산소 측정기(Illinois instrument Co., USA)를 이용 3분에 1회,
톨루엔 농도는 G.C. (Model No. GCS-14PFFS, SHIMADZU, Japan)를 이용 15
분 간격으로 1회씩 모니터링 하였으며, 4시간 노출 종료 후 48시간 관찰기간을
가지며 특이적 임상 및 사망 유·무를 관찰하였다.

(3) 산소결핍 환경에서 습도변화에 따른 임상증상 및 운동성 영향
각 시험농도 군별 흡입챔버(SIBATA Co., Japan) 내 수컷 SD rat 10마리를 한
군으로 하고 HEPA filter 및 온, 습도 조절장치를 통해 정화된 사육실내 청정
공기와 질소표준가스를 이용 흡입챔버 내에 공급하며(150 L/min 수준) 각 시험
군별 산소농도를 6%(질소 94%)의 환경으로 만들고, 산소 결핍상황(산소 6%)에
서 초음파가습기(오성사, H-557)를 이용 흡입챔버 내 습도(상대습도)를 20, 60,
90% 조건으로 하여 각각 4시간 노출시키며 실험동물의 운동 및 호흡상태, 치
사여부 등의 임상증상 확인과 운동능력 측정 장치(activity monitoring system;
SIBATA, Japan)를 이용 실험동물의 운동성 변화를 측정하였다. 또한 시험물질

노출기간 중 산소농도는 산소 측정기(Illinois instrument Co., USA)를 이용 3분에 1회, 습도는 자동 환경측정장치(ICS-20RG, SIBATA Co., Japan)를 이용 15분 간격으로 1회씩 모니터링 하였으며, 4시간 노출 종료 후 48시간 관찰기간을 가지며 특이적 임상 및 사망 유·무를 관찰하였다.

(4) 산소결핍 환경에서 온도변화에 따른 임상증상 및 운동성 영향
 각 시험농도 군별 흡입챔버(SIBATA Co., Japan) 내 수컷 SD rat 10마리를 한 군으로 하고 HEPA filter 및 온, 습도 조절장치를 통해 정화된 사육실내 청정공기와 질소표준가스를 이용 흡입챔버 내에 공급하며(150 L/min 수준) 각 시험군별 산소농도를 6%(질소 94%)의 환경으로 만들고, 산소 결핍상황(산소 6%)에서 전열기(한일금속주식회사, CER 2.0)를 이용 흡입챔버 내 온도를 20, 30, 40°C 조건으로 하여 각각 4시간 노출시키며 실험동물의 운동 및 호흡상태, 치사여부 등의 임상증상 확인과 운동능력 측정 장치(activity monitoring system; SIBATA, Japan)를 이용 실험동물의 운동성 변화를 측정하였다. 또한 시험물질 노출기간 중 산소농도는 산소 측정기(Illinois instrument Co., USA)를 이용 3분에 1회, 온도는 자동 환경측정장치(ICS-20RG, SIBATA Co., Japan)를 이용 15분 간격으로 1회씩 모니터링 하였으며, 4시간 노출 종료 후 48시간 관찰기간을 가지며 특이적 임상 및 사망 유·무를 관찰하였다.

(5) 산소결핍 환경에서 이산화탄소에 따른 임상증상 및 운동성 영향
 각 시험농도 군별 흡입챔버(SIBATA Co., Japan) 내 수컷 SD rat 10마리를 한 군으로 하고 이산화탄소(CO₂), 산소, 질소로 구성된 표준가스를 이용 흡입챔버 내에 4시간 노출하며 실험동물의 운동 및 호흡상태, 치사여부 등의 임상증상 확인과 운동능력 측정 장치 (activity monitoring system; SIBATA, Japan)를 이용 실험동물의 운동성 변화를 측정하였다. 시험군별 시험가스의 조성은 이산화탄소(TWA 5,000 ppm, STEL 3만 ppm) 농도를 중심으로 1군 CO₂ 2%, O₂

6%, N₂ 92%, 2군은 CO₂ 4%, O₂ 6%, N₂ 90%, 3군은 CO₂ 8%, O₂ 6%, N₂ 86%의 표준가스(순도 99.98%)를 이용 시험동물에 전신노출 시켰다.

시험물질 노출기간 중 산소농도는 산소 측정기(Illinois instrument Co., USA)를 이용 3분에 1회, 온·습도는 자동 환경측정장치(ICS-20RG, SIBATA Co., Japan)를 이용 15분 간격으로 1회씩 모니터링 하였으며, 4시간 노출 종료 후 48시간 관찰기간을 가지며 특이적 임상 및 사망 유·무를 관찰하였다.

(6) 산소결핍 환경에서 황화수소에 따른 임상증상 및 운동성영향

각 시험농도 군별 흡입챔버(SIBATA Co., Japan) 내 수컷 SD rat 10마리를 한 군으로 하고 황화수소(H₂S), 산소, 질소로 구성된 표준가스를 이용 흡입챔버 내에 4시간 노출하며 실험동물의 운동 및 호흡상태, 치사여부 등의 임상증상 확인과 운동능력 측정 장치 (activity monitoring system; SIBATA, Japan)를 이용 실험동물의 운동성 변화를 측정하였다. 시험군별 시험가스의 조성은 황화수소(TWA 10 ppm, STEL 15 ppm)를 기준으로 1군 H₂S 20 ppm, O₂ 6%, N₂ 94%, 2군은 H₂S 100 ppm, O₂ 6%, N₂ 94%, 3군은 H₂S 500 ppm, O₂ 6%, N₂ 94%의 표준가스(순도 99.98%)를 이용 시험동물에 전신노출 시켰으며, 추가 시험으로 하여 H₂S 350 ppm, O₂ 6%, N₂ 94%의 가스를 이용 실험동물의 치사여부를 확인하였다.

시험물질 노출기간 중 산소농도는 산소 측정기(Illinois instrument Co., USA)를 이용 3분에 1회, 온·습도는 자동 환경측정장치(ICS-20RG, SIBATA Co., Japan)를 이용 15분 간격으로 1회씩 모니터링 하였으며, 4시간 노출 종료 후 48시간 관찰기간을 가지며 특이적 임상 및 사망 유·무를 관찰하였다.

(7) 산소결핍 환경에서 일산화탄소에 따른 임상 및 운동성 영향

각 시험농도 군별 흡입챔버(SIBATA Co., Japan) 내 수컷 SD rat 10마리를 한 군으로 하고 일산화탄소(CO), 산소, 질소로 구성된 표준가스를 이용 흡입챔버

내에 4시간 노출하며 실험동물의 운동 및 호흡상태, 치사여부 등의 임상증상 확인과 운동능력 측정 장치 (activity monitoring system; SIBATA, Japan)를 이용 실험동물의 운동성 변화를 측정하였다. 시험군별 시험가스의 조성은 일산화탄소(TWA 30 ppm, STEL 200 ppm)를 기준으로 1군 CO 300 ppm, O₂ 6%, N₂ 94%, 2군은 CO 600 ppm, O₂ 6%, N₂ 94%, 3군은 CO 1,200 ppm, O₂ 6%, N₂ 93.9%의 표준가스(순도 99.98%)를 이용 실험동물에 전신노출 시켰다. 시험물질 노출기간 중 산소농도는 산소 측정기(Illinois instrument Co., USA)를 이용 3분에 1회, 온·습도는 자동 환경측정장치(ICS-20RG, SIBATA Co., Japan)를 이용 15분 간격으로 1회씩 모니터링 하였으며, 4시간 노출 종료 후 48시간 관찰기간을 가지며 특이적 임상 및 사망 유·무를 관찰하였다.

(8) 실험동물의 사망 유·무 및 임상관찰

검역 및 순화기간, 4시간 노출 및 48시간 회복기간에는 매일 1회 모든 동물에 대해 생사의 유·무, 외관, 운동성, 출혈, 호흡이상 등 일반증상에 대하여 관찰하였으며, 검역, 순화후 시험물질 노출 전, 48시간 회복 후 생존 실험동물에 대해 체중을 측정하였다.

(9) 운동성 변화 측정

산소결핍 상황에서 시험물질 노출에 따른 각 시험군 실험동물의 운동성 영향을 확인하기 위하여 시험방법은 미국 EPA의 “OPPTS 870.6200, Neurotoxicity screening battery”를 참고하여 운동능력 측정 장치 (activity monitoring system; Sibata, Japan)를 이용 사진 2와 같이 시험물질 노출기간 중 동물케이지에 적외선 감시 장치를 부착 실험동물의 움직임을 계수하여 이를 적산 기록되게 하고 이를 대조군과 각 노출군 별 운동성의 변화를 비교 평가하였다.



[사진 2] 시험물질 노출과 실험동물의 운동성 측정 전경

4) 산소농도 측정 및 측정 기기의 검정

산소측정 및 기록계는 사진 3과 같이 자동 산소농도측정기(Illinois instrument Co., USA)를 사용하였으며 검·교정은 18%(리가스주식회사, 순도: 18.04%) 표준가스로 검·교정 하였다.

또한 사진 4와 같이 산소 검지기(Gastec LTD., model No. 31b, Japan)를 이용 자동 산소농도 측정기와의 동일한 조건에서의 측정치 비교결과는 Table 1과 같았으며 산소농도측정기와 검지관법에서의 측정 농도 값이 유사하게(5%이내) 측정되었다.

<Table 1> 산소농도 측정기에 따른 공기 중 산소농도 측정 결과
단위: 산소농도(%)

구 분	실내공기 측정				흡입챔버 내 산소결핍 시험 중 측정				비 고
	1회	2회	3회	평균	1회	2회	3회	평균	
산소 측정기	20.6	20.5	20.8	20.63	6.2	6.1	6.2	6.17	
검지관법	21.0	20.5	20.8	20.77	6.0	6.3	6.3	6.20	

※ 참고사항: 실내 산소측정결과 실내에는 약 20.6%였으나 rats 10마리 수용의 흡입챔버 내에는 20.3%로 측정되었으며, 이는 흡입챔버 내의 동물 수용에 따른 호흡영향과 습기, 환기의 영향으로 산소농도가 낮게 평가되었음.



[사진 3] 자동 sampling기 및 산소농도 측정기



[사진 4] 산소측정 검지관과 검지기, 시료용 테프론 봉투

3. 통계처리

각 시험결과의 통계처리는 평균과 표준편차로 표기하고 시험군별 동물의 체중 비교는 Paired-Sample t-test를 시행하였다. 유의수준은 5%($p < 0.05$)의 신뢰한계로 검정하고 최종으로는 1%($p < 0.01$), 0.1%($p < 0.001$)의 신뢰한계로서 대조군과 노출군의 유의성을 확인하였다. 또한 필요시 Sigmastat의 일원배치분산분석(One-way ANOVA)을 하였으며 유의성이 인정된 자료는 Dunnett 다중비교법을 이용 5% 수준에서 유의차 검정을 하였다.

III. 연구 결과

1. 국내·외 산소결핍 재해 예방제도 및 사고사례 조사

1) 국내·외 산소결핍 재해예방 제도조사

(1) 한국

한국의 경우 산업안전보건법에서는 “산소결핍이라 함은 공기 중의 산소농도가 18% 미만의 상태를 말한다.” 로 규정하고 있으며, “적정한 공기라 함은 산소 18%이상, 23.5%미만, 탄산가스 1.5%미만, 황화수소 10 ppm미만 수준의 공기” 정하고, “밀폐공간이라 함은 산소결핍, 유해가스로 인한 화재·폭발 등의 위험이 있는 장소” 로 물이 통하지 않는 지층에 접하거나 통하는 우물, 맨홀, 핏트 내부, 장기간 밀폐된 산화하기 쉬운 밀폐 공간, 산소를 흡수하는 저장시설, 곡물 저장시설, 발효시설, 내부부패 탱크, 가스저장탱크, 산소농도가 18%미만 또는 23.5%이상, 탄산가스 농도가 1.5% 이상, 황화수소 10 ppm이상의 장소, 콘크리트 양생장소, 반응탱크 등 산업안전보건법 동 보건기준에 관한 규칙의 별표 3에 밀폐공간의 종류를 규정하고 있다.

(2) 미국

미국의 산업안전보건청(OSHA)의 Regulations(standards-29CFR)의 Standard Number: 1910.146 “Permit-required confined spaces”에는 “산소결핍 대기란 부피로 19.5%이하의 산소를 포함하는 대기”로 규정하고 있으며, “허가가 요구되는 밀폐공간이란 (1) 유해한 대기를 포함하고 있거나, 포함할 가능성을 가지고

있는 공간, (2) 들어가는 사람을 빨아들일 가능성을 가진 요소를 포함한 공간, (3) 들어가는 사람이 갇히거나 질식할 수 있는 내부 구조를 가진 밀폐 공간, (4) 기타 안전 보건상의 심각성이 인지되는 밀폐 공간”으로 정의하고 있다.

(3) 일본

일본의 경우 노동안전위생법에 “산소결핍이란 공기 중의 산소의 농도가 18% 미만인 상태를 말하며, 산소결핍 등이라 하면 산소결핍상태 또는 공기 중의 황화수소의 농도가 백만 분의 10 (10 ppm)을 넘는 상태를 말한다.”로 규정되어 있으며, “산소결핍증 등이라 함은 산소 결핍증 또는 황화수소 중독을 말한다.”로 규정하고 있어 산소결핍에 있어 황화수소와 산소결핍에는 밀접한 관계로 정의하고 있다. 또한 산소결핍 장소라 함은 한국의 산업안전보건법과 같이 물이 통하지 않는 지층에 접하거나 통하는 우물, 맨홀, 펌트 내부, 장기간 밀폐된 산화하기 쉬운 밀폐 공간, 산소를 흡수하는 저장시설, 곡물 저장시설, 발효시설, 내부부패 탱크, 가스저장탱크 등으로 정하고 있다.

(4) 영국

영국의 경우 “밀폐 공간이란 챔버, 탱크, 양조 및 염색용 큰 통, 사일로, 채석장, 파이프, 하수구, 굴뚝(연도), 우물이나 밀폐된 상태에서 확연한 위험이 발생할 수 있는 다른 유사한 공간을 의미한다.”로 규정(The confined Spaces Regulations, 1997)하고 있으며, 산소결핍의 산소농도는 규정하고 있지 않으나 “유해한 물질이나 위험한 조건(예, 산소 결핍)으로 인해 사망이나 심각한 부상의 위험을 가지고 있는 밀폐된 공간이다”로 규정(Safe work in confined spaces)하고 있다.

(5) 캐나다

캐나다의 경우 산업안전보건법(Part XI of Canada occupational Health and

Safety Regulations, SOR/86-304)에 “밀폐공간의 산소농도는 정상 기압에서 부피 기준으로 18.5% 이하나 23% 이상이 되지 않도록 하여야 한다.”로 규정하고 있으며, “밀폐 공간이란 (1) 작업 목적 외에는 사람이 상주하지 않는 것을 목적으로 설계된 공간 (2) 들어가고 나감에 있어 제한이 있는 공간 (3) 설계, 건축, 위치, 대기 또는 자재들이 원인이 되어 사람이 출입했을 때 유해한 공간”으로 정의하고 있다.

(6) 호주

호주의 표준 2865(Australian Standard 2865)에 따르면 밀폐공간이란 다음과 같은 완전히 또는 부분적으로 밀폐된 공간으로

- 작업장으로 처음부터 계획되거나 설계되지 않은 곳
- 출입 방법이 제한되어 있는 곳
- 오염물의 잠재적인 위험수준을 가지고 있는 공기를 가진 곳

즉, 안전한 산소농도를 가지지 못하거나 산소 소비의 원인이 될 수 있는 곳으로 되어있다.

2) 국내·외 산소결핍 사고사례 조사 및 분석

(1) 국내 사고사례 조사 및 분석

최근 산소결핍관련으로 산업재해는 Table 2와 같이 점차 증가추세에 있으며 이는 지하 매설 시설 보수, 맨홀작업, 건설현장 밀폐 공간 등 작업 시 산소 결핍 및 질식사고 등으로 증가 추세에 있으며 이는 TCE, DMF 등 각종 유해 화학물질 중독에 의한 사망자 수('04년 14명, '05년 22명, '06년 23명)와 유사한 발생 수를 보이고 있으며, '99년부터 '07년간 발생한 재해의 경우 발생장소로는 맨홀(28.3%), 오폐수처리장(20%), 선박내부(12.8%) 순으로 나타났으며, 기인물로는 산소결핍(41.4%), 유해가스 질식(59%)이었으며, 유해가스로는 일산화탄소(36%), 황화수소(19%), 유기성 혼합가스(17%), 아르곤, 질소 등 치환가스(11%), 이산화탄소(3%)아르곤 등으로 나타났으며, 업종별로는 건설업이 41.7%, 제조업이 23.3%, 위생, 서비스업이 12.2%순이었으며, 계절별로는 6월에서 9월에 집중적(52%)으로 일어났다. 또한 재해자 중에는 처음 재해자를 구조하기 위해 구조작업을 벌이다 사망한경우도 13.3%로 밀폐장소의 작업방법 뿐만 아니라 사고발생시 구조방법에 대한 문제점도 지적되었다(한국산업안전공단, 2008).

<Table 2> 최근 5년간 산소결핍에 의한 사망사고

구분	년도	2007	2006	2005	2004	2003
사망진수	사망자(명)	31	20	22	16	21
	사고 수(건)	19	16	16	12	17
	증감율(%)	기준년도	△9.1	37.5	△23.8	90.9
부상자수	부상자(명)	7	7	3	4	1

또한 이들 중대재해 중 최근(2007년도 기준) 국내에서 일어난 산소결핍 또는 급성중독에 의한 사망사고에 대해 조사한 재해조사 결과보고서(한국산업안전공단, 2007)의 일부에 대해 사고 상황 및 사고요인들을 분석한 내용은 다음과 같다.

- 2007. 6. 16(토) 경기도 양주시 000폐수 저장조에서 산소결핍으로 인한 사망 사고가 있었으며 사고 후 현장의 환경측정 결과 산소농도는 13.3%(기준: 18% 이상), 황화수소 3 ppm(노출기준: 10 ppm), 일산화탄소는 727 ppm(노출기준: 30 ppm)으로 측정되어졌다.
- 2007. 6. 30(토) 경기도 고양시 덕양구 000오수관 보수작업 중 산소결핍 및 유해가스에 의한 사망사고가 발생하였으며, 조사결과 맨홀 하부의 침적된 슬러지에 함유되었던 유해가스(메탄, 황화수소 등) 및 산소결핍에 의한 사망으로 추정되었다(사고 후 측정시 이상 없음).
- 2007. 8. 2(목) 대전광역시 대덕구 000상수도관 맨홀작업 사망사고가 있었으며 작업환경 측정결과 산소농도 16.2~16.5%, 가연성가스 0%, 일산화탄소 1~3 ppm, 황화수소 0 ppm으로 측정됨
- 2007년 9월 경북 경산시 000쓰레기 매립장 지하수 집수정 맨홀 작업 중 산소결핍에 의한 사망사고로 재해 조사시 깊이 4 m의 맨홀 바닥부근 산소농도는 10.7 % 이었음
- 2007년 6월 대구광역시 달서구 000오수처리장의 지하실(사진 5 참조) 공기 공급기(BLOWER)의 시설 점검 작업 중 호흡곤란으로 사망하였으며 환경 측정 결과 산소 21.0 %, 황화수소 7.5 ppm



[사진 5] 오수 처리장 지하실 질식사고 사례 현장

- 2007. 6. 30(토) 경기도 의왕시 000하수처리운영사업소 침사지 유입 수문 브라켓 교체작업 중 황화수소 등으로 추정되는 유해가스에 의해 질식되어 사망
- 2007. 9. 7(금) 경남 거제시 000중공업에서 건조중인 LNG호선의 갑판 상부에서 SUS(스테인리스강) 용접작업 중 아르곤가스 흡입 또는 산소부족 등에 의해 의식불명 후 사망사고 발생. 조사결과 산소농도부족(8.7%)과 아르곤 가스에 의한 질식사망으로 추정
- 2007. 2. 8(목) 인천시 남동구 000도로지하 우수박스관로에서 우수박스관(지하 3.4 m)로 점검 중 유해가스 등으로 질식 사망한 재해로 추정되며, 사고 후 측정결과 산소 20.6%, CO 9 ppm, 황화수소 45 ppm, CH4 미량검

출.

- 2007. 9. 23(일) 경기도 안산시 000폐수 집수조 청소작업 중 황화수소 등으로 추정되는 유해가스에 의해 질식되어 1명은 사망하고 2명은 회복한 재해로 사고 후 측정결과 산소 20.9%, CO 1-2 ppm, 황화수소 1-2 ppm, 폐수 pH 1-2 로 측정됨
- 2007. 10. 31(수) 경기도 김포시 000재래식 불 한증막 내에서 불이 타고 있는 한증막내의 열려져 있는 철문을 닫으려다 일산화탄소 중독에 의해 사망한 것으로 추정되며, 측정결과 불 한증막 내의 일산화탄소(CO)농도가 102 - 343 ppm, 산소농도 20.7%, 가연성가스 1 - 2%이었음(사진 6 참조)



[사진 6] 불 한증막 일산화탄소 중독사례 현장

- 2007. 9. 8(토) 충남 서산시 000하수종말처리장 건설공사 현장에서 오수관로 청소작업을 위해 맨홀 내 물(바닥높이 약 1 m) 위에 떠있는 부유물을 건지던 중 맨홀 내부의 산소결핍공기에 질식된 후 하부에 고인 물에 빠져 사망한 것으로 추정되며, 측정결과 산소 12.2-18.1%, 일산화탄소와 탄화수소 등은 미량(1 ppm이하)검출됨.

- 2007. 6. 27(수) 음식물 쓰레기 투입구(반입 저장조) 스크류에 끼어있는 폐비닐을 제거하기 위해 개방된 투입구에 진입했다 질식하여 의식을 잃고 쓰러지자 동료가 피해자를 구하러 들어갔다가 함께 의식을 잃었으며, 1명은 사망, 2명은 회복되었으며, 재해 상황과 유사한 조건에서 환경측정 결과 산소농도 10.3%, 일산화탄소 350 ppm, 황화수소 농도 22 ppm이었음(사진 7참조)



[사진 7] 음식물 쓰레기투입구 질식사고 사례 현장

- 2007. 9. 13(목) 경남 사천시 000하수종말처리장 집수조 내부 사진촬영을 위해 2명이 진입했다가 의식을 잃었으며, 이를 구조하기 위해 추가 1명이 진입하였으며 곧 구조대원들에 의해 구출되었으나 앞선 2명은 사망하고 후 1명은 향후 회복되었음. 환경측정 시 산소농도 20.9%, 가연성 가스(LEL) 0-4%, CO 2-3 ppm, 황화수소 2-209 ppm이었음.

또한 2008년도 최근 대전의 000아파트 정화조 청소 작업 시 일어난 재해로

2008. 6. 6(금) 대전 문화동 000아파트 정화조 청소작업을 위해 작업자 2명이 지하탱크에 진입하다 쓰러져 긴급히(2-3분내) 바깥에 있는 2명이 추가 진입하여 구조작업을 벌이다 4명이 전부 쓰러짐. 20-30분 후 소방대원에 구출되었으나 추가 들어간 2명은 사망하고, 먼저 진입한 2명은 부상후 회복되었음. 사고 후 환경측정결과(3시간 후이며 내부 환경이 변화되었음) 산소

20.7%, 황화수소 132 ppm, 암모니아 불 검출, 일산화탄소 1-2 ppm, 가연성 가스 2%이었으며 사고원인은 황화수소 등에 의한 가스중독의 질식재해로 추정함.

상기 재해 사례들과 같이 밀폐공간에서 발생하는 재해를 분석하여 보면 봄, 여름의 하절기에 전체의 50%를 상회하고 있었으며, 업종별로는 건설업에서, 그리고 맨홀작업에서 50%정도가 발생하였다. 특히 계절적 요인의 경우 봄, 여름이 가을, 겨울에 비해 온도가 높아 유기물의 부패 및 미생물의 급격한 번식, 금속 성분 등 강한 산화작용으로 인해 밀폐 공간 내 산소 소모량이 많아 산소의 농도가 낮아지고 상대적으로 이산화탄소나 유기성가스 등의 농도가 높아져 산소 결핍이나 질식의 위험요인이 큰 것으로 판단되었다.

(2) 외국의 산소결핍 사고사례 조사 및 분석

가) 미국

미국의 경우 Suruda(1989)의 OSAH IMIS(Integrated Management Information System)산소결핍에 의한 사망사고 분석 자료에 의하면 1984-6년 동안 미국 47 개주에서 4,756명의 사망사고가 발생하였으며 이중 423명(8.9%)이 질식 및 중독에 의한 사망 사고였고, 이들 중 190명은 붕괴에 의한 질식사, 나머지 233명의 사망은 Table 3과 같이 48명은 아르곤이나 질소산화물 같은 단순 질식제(simple asphyxiants)에 의한 재해, 27명은 특정 물질을 알 수 없는 산소가 부족한 공기에 의한 것이었으며, 65명은 독성가스(toxic gases), 35명은 유기용제(solvent), 9명은 다른 독성 물질에 의한 것으로 조사되었다(Suruda, 1989).

<Table 3> Causes of asphyxiation and poisoning in death investigations in the OSHA

<i>Simple asphyxiants</i>	<i>Solvents</i>	<i>Mechanical</i>
1 Propane	1 Chlorodifluoromethane	42 Total
10 Methane	1 Coal tar pitch volatiles	
7 Argon	2 Dichlorodifluoromethane	
18 Nitrogen	1 Diesel fuel	<i>Other</i>
12 Carbon dioxide	3 Gasoline	1 Dimethyl sulphate
48 Total	1 Isopropanol	1 Maleic anhydride
	1 Methyl chloride	1 Sulphuryl fluoride
<i>Toxic gases</i>	4 Methyl chloroform	1 Cyanide
	8 Methylene chloride	4 Hydrogen fluoride
3 Ammonia	3 Naphtha	1 Phosphorus (yellow)
25 Carbon monoxide	1 Perchloroethylene	
3 Chlorine	2 Toluene	9 Total
30 Hydrogen sulphide	4 Trichlorotrifluoroethane (F-113)	
4 Nitrous oxide	2 Trichloroethylene	
65 Total	1 Trichloroethane	
	35 Total	
<i>Oxygen deficient atmosphere (substance not reported)</i>	<i>Unidentified or report incomplete</i>	<i>Table total</i>
27 Total	7 Total	233

This table does not include the 190 asphyxiations due to trench cave-ins

그리고 사망자수를 산업별로 분류하면 제조업 38%, 상업 14%, 건설업 12%, 오일 및 가스 산업 11% 순이었으며 질식 및 중독의 가장 높은 비율은 오일 및 가스 산업과 장치산업이었으며 이러한 산업에는 황화수소, 그리고 하수구, 맨홀, 오일 저장탱크에는 메탄가스와 같은 탄화수소와 관련 있었으며, 사망사고가 발생한 작업장의 종류와 특성을 보면 양조 염색용 큰 통(vats), 탱크(tanks), 원자로 용기(reactor vessels), 선박화물칸(ship holds), 기타 환기불량한 곳이었으며, 이들 중 가장 많은 단일 밀폐장소는 31명이 사망한 하수구와 맨홀인 것으로 나타났다.(Suruda, 1989)

또한 미국 노동통계국(U.S. Bureau of Labor Statistics) 자료(Census of Fatal Occupational Injuries, 2006)에 의하면 직업성 재해에 대해 사고 종류와 노출 물질을 산업별로 분류하였으며, 산소결핍사고는 참호 및 붕괴에 의한 산소 결

핍(Depletion of oxygen from cave-in or collapsed materials), 익사 및 익수(Drowning, submersion) 그리고 밀폐 공간 작업시 산소 고갈(Depletion of oxygen in other enclosed, restricted, or confined space)로 분류하였는데 Table 4와 같이 밀폐공간 작업시의 산소 결핍만을 보면 1992년부터 2002년 동안 5번이나 산소결핍에 의한 사망사고가 10건이 넘게 발생하였고, 그 후 2003년에 7건, 2004년에 9건 발생하였으나 2005년엔 발생되지 않았으며, 2006년에는 Table 5와 같이 4건이 발생 점차 감소하는 경향을 보이고 있었다(U.S. Bureau of Labor Statistics, 2006).

<Table 4> Fatal occupational injuries by selected characteristics

Characteristics	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001 ¹	2002
Event or exposure⁵ - continued											
Fall from piled or stacked material	3	7	5	-	4	5	3	4	-	5	-
Fall from roof	108	120	129	143	149	154	157	153	150	159	143
Fall through existing roof opening	8	6	11	18	15	20	12	14	15	11	11
Fall through roof surface	12	14	18	19	21	17	20	16	12	26	11
Fall through skylight	10	19	14	18	16	17	22	18	16	23	20
Fall from roof edge	44	38	41	36	46	56	47	70	69	55	62
Fall from scaffold, staging	66	71	89	82	88	87	98	92	85	91	88
Fall from building girders or other structural steel	37	40	34	34	38	48	44	49	44	41	41
Fall from nonmoving vehicle	39	33	48	34	55	53	48	47	61	58	60
Fall to lower level, n.e.c.	95	112	119	117	117	121	107	116	123	143	119
Jump to lower level	8	8	7	3	13	4	-	3	3	5	-
Jump from structure, or structural element	3	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-
Fall on same level	62	49	63	53	52	44	51	70	56	84	64
Fall to floor, walkway, or other surface	43	35	46	33	40	33	34	54	44	65	53
Fall onto or against objects	14	9	14	13	7	9	8	10	9	11	9
Exposure to harmful substances or environments	605	592	641	609	533	554	576	533	481	499	539
Contact with electric current	334	325	348	348	281	298	334	280	256	285	289
Contact with electric current of machine, tool, appliance, light fixture	60	44	63	55	46	41	51	51	42	47	42
Contact with wiring, transformers, or other electrical component	66	100	98	94	70	71	84	76	67	78	90
Contact with overhead power lines	140	115	132	139	116	138	153	125	128	124	122
Contact with underground, buried power lines	-	5	6	5	5	5	9	4	-	4	4
Struck by lightning	15	16	15	17	18	22	21	13	7	15	16
Contact with temperature extremes	33	38	50	56	33	40	48	51	29	35	60
Exposure to environmental heat	12	22	28	35	18	22	34	35	21	24	40
Exposure to environmental cold	5	4	7	8	-	-	-	-	-	-	5
Contact with hot objects or substances	16	11	15	13	13	17	11	15	7	9	14
Exposure to caustic, noxious, or allergenic substances	127	116	133	107	123	123	105	108	100	96	99
Inhalation of substance	83	68	84	62	76	59	48	55	48	49	49
Inhalation in enclosed, restricted, or confined space ⁶	51	43	44	35	56	25	27	23	22	25	20
Inhalation in open or nonconfined space	18	15	24	21	12	19	14	23	20	18	23
Contact with skin or other exposed tissue	5	3	-	3	5	3	4	-	5	7	-
Injections, stings, venomous bites	10	10	11	9	14	23	12	16	10	9	10
Needle sticks	3	-	-	-	3	7	-	6	-	-	-
Bee, wasp, hornet sting	4	5	8	4	5	10	3	5	6	3	6
Ingestion of substance	13	13	12	18	20	26	20	21	24	18	23
Oxygen deficiency	111	112	109	97	95	90	87	92	94	83	90
Drowning, submersion	78	90	89	77	70	72	75	75	75	69	60
Depletion of oxygen from cave-in or collapsed materials	-	4	3	-	-	-	-	-	-	-	-
Depletion of oxygen in other enclosed, restricted, or confined space ⁶	13	3	-	10	12	5	7	-	5	13	10

출처: Census of Fatal Occupational Injuries (CFOI) - Current and Revised Data. 1992-2006. U.S. Bureau of Labor Statistics

<Table 5> Fatal occupational injuries by event or exposure and major private industry division, All United States, 2006

Event or exposure ²	Total fatalities (number)	Goods producing				Service providing							
		Total goods producing	Natural resources and mining ³	Construction	Manufacturing	Total service providing	Trade, transportation, and utilities	Information	Financial activities	Professional and business services	Education and health services	Leisure and hospitality	Other
Struck by lightning.....	9	5	--	3	--	3	--	--	--	--	--	--	--
Contact with electric current, n.e.c.....	3	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
Contact with temperature extremes.....	56	38	8	18	10	18	8	--	--	5	--	--	--
Exposure to environmental heat.....	44	28	8	16	4	14	6	--	--	5	--	--	--
Contact with hot objects or substances.....	11	8	--	--	6	--	--	--	--	--	--	--	--
Exposure to air pressure changes.....	4	--	--	--	--	3	--	--	--	3	--	--	--
Pressure changes underwater.....	4	--	--	--	--	3	--	--	--	3	--	--	--
Exposure to caustic, noxious, or allergenic substances.....	165	68	12	36	20	94	32	--	4	20	15	12	--
Exposure to caustic, noxious, or allergenic substances, unspecified.....	23	6	--	3	--	16	--	--	--	3	3	4	--
Inhalation of substance.....	59	30	3	19	6	27	8	--	--	8	--	5	--
Inhalation of substance, unspecified.....	6	4	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
Inhalation in enclosed, restricted, or confined space.....	15	8	--	6	--	6	--	--	--	--	--	--	--
Inhalation in open or nonconfined space.....	38	18	--	13	5	20	7	--	--	7	--	--	--
Injections, stings, venomous bites.....	23	9	4	3	--	14	--	--	--	5	5	--	--
Bee, wasp, hornet sting.....	5	3	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
Other stings or venomous bites.....	4	--	--	--	--	4	--	--	--	3	--	--	--
Injections, stings, venomous bites, n.e.c.....	12	6	--	--	--	6	--	--	--	--	3	--	--
Ingestion of substance.....	56	20	--	11	7	36	19	--	--	4	5	--	--
Oxygen deficiency, n.e.c.....	68	30	17	10	3	31	7	--	--	10	8	--	--
Drowning, submersion.....	53	26	17	7	--	20	4	--	--	10	4	--	--
Choking on object or substance.....	11	--	--	--	--	10	--	--	--	--	4	--	--
Depletion of oxygen in other enclosed, restricted, or confined space.....	4	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
Exposure to harmful substances or environments, n.e.c.....	4	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
Transportation accidents.....	2,459	823	375	323	125	1,369	889	40	43	185	94	62	--
Highway accident.....	1,356	318	106	152	60	870	628	29	20	95	48	23	--
Highway accident, unspecified.....	23	5	--	3	--	15	9	--	--	--	--	--	--
Collision between vehicles, mobile equipment.....	657	147	52	67	28	420	283	17	14	44	34	14	--
Collision between vehicles, mobile equipment, unspecified.....	30	7	--	4	--	22	12	3	--	4	--	--	--
Re-entrant collision.....	8	--	--	--	--	4	4	--	--	--	--	--	--
Moving in same direction.....	155	30	13	11	6	108	84	--	--	9	7	--	--
Moving in opposite directions, oncoming.....	239	62	22	28	12	144	88	8	4	15	17	6	--
Moving in intersection.....	140	37	10	20	7	80	44	3	7	10	9	3	--
Moving and standing vehicle, mobile equipment--in roadway.....	52	4	--	--	--	43	34	--	--	5	--	--	--
Moving and standing vehicle, mobile equipment--side of road.....	23	--	--	--	--	17	14	--	--	--	--	--	--

출처: Census of Fatal Occupational Injuries (CFOI) - Current and Revised Data. 1992-2006. U.S. Bureau of Labor Statistics

(나) 일본

일본의 경우는 산소결핍증 및 황화수소중독 재해발생 사례는 아래 Table 6과 같이 최근 감소추세에 있으나 매년 10여건의 동종재해가 발생하고 있으며, 최근 10년간 재해발생 건수는 109건이었으며, 발생 형태별 원인을 분석하면 질소, 이산화탄소 및 아르곤 가스 등 무산소기체로의 치환으로 인한 발생건수가 66건

으로 가장 많으며, 다음으로 유기물의 부패, 미생물의 호흡 등이 18건, 탱크 및 다른 소재의 산화 14건, 목재 등의 호흡작용 3건, 토양 내 제1철 염류의 산화 1건, 기타 7건의 순으로 나타났다(<http://www.mhlw.go.jp>).

<Table 6> 일본의 산소결핍증 및 황화수소 중독 재해발생현황

구 분		'97	'98	'99	'00	'01	'02	'03	'04	'05	'06	계
합계	피해자수	30	35	22	28	22	28	7	15	12	15	526
	사망자수	8	11	9	16	8	22	3	5	4	11	228
	발생건수	18	22	13	20	17	14	7	12	10	14	342
산소결 핍증	피해자수	25	28	9	21	15	10	5	11	9	12	367
	사망자수	8	9	3	10	7	7	3	2	4	9	168
	발생건수	15	17	7	17	12	7	5	10	8	11	256
황화수 소중독	피해자수	5	7	13	7	7	18	2	4	3	3	159
	사망자수	0	2	6	6	1	15	0	3	0	2	60
	발생건수	3	5	6	3	5	7	2	2	2	3	86

무(無) 산소 기체의 경우 기체물질의 종류를 보면 질소가 28건으로 가장 많았고 그다음에 이산화탄소 12건, 프로판 10건, 아르곤가스 등이었다. 또한 최근 10년간 황화수소 중독으로 38건이 발생되었으며 발생형태를 보면 대부분 분뇨 및 오수로부터 30건이 발생되었으며 산소결핍과 더불어 하절기에 많은 발생을 보이거나 황화수소의 경우 특히 하절기(8월)에 최고를 나타내었고 동절기(1-2월 또는 11-12월)에는 발생건수가 상대적으로 적은(월 2건 이하) 것이 특징이었다(<http://www.mhlw.go.jp>).

(다) 호주

호주의 산소결핍 사망사고에 대한 원인 분석 자료를 보면 밀폐 공간 사고의 주요 원인은 밀폐 공간 작업의 실태에 의한 것으로 평가되어 있으며, 중대사고의 95%는 유해한 공기에 그 원인이 있었고 밀폐 공간 출입 전에 공기에 대한 측정을 실시 않은 것으로 나타남. 또한 중대사고 발생시 60% 정도는 다른 사람들을 구조하는 동안에 사망하였으며, 사고가 발생한 대부분의 경우 작업절차가 부적절하거나 지켜지지 않으며, 중대사고의 64%는 외주작업으로 이루어 졌으며 희생자의 경우 사전에 안전교육을 받은 자는 3% 미만으로 나타났다 (Australian Safety News, 1998).

2. 산소결핍의 원인분석 및 예방대책

1) 산소결핍 위험작업의 종류

상기 산소결핍 재해예방제도 및 사고사례 분석 등을 통하여 산소결핍 작업장소의 종류는 크게 다음과 같이 분류되었다.

- (1) 지층에 접하거나 통하는 우물, 수직갱, 터널, 잠함, 피트 등의 내부
- (2) 장기간 사용하지 않은 우물 등의 내부
- (3) 케이블, 가스관 또는 지하에 부설되어 있는 매설물을 수용하기 위하여 지하에 부설한 암거·맨홀 또는 피트 내부
- (4) 빗물·하천의 유수·용수가 체류하거나 체류하였던 통·암거·맨홀 또는 피트의 내부

- (5) 해수가 체류하고 있거나 체류하였던 암거·맨홀 또는 피트 내부
- (6) 장기간 밀폐된 강재의 보일러 탱크, 반응탑 등의 내부
- (7) 천장·바닥 또는 벽에 건성유 페인트 도장으로 건조되기 전에 밀폐된 지하실 창고 또는 탱크 등 통풍이 불충분한 시설의 내부
- (8) 분뇨·씩은 물 기타 부패하거나 분해되기 쉬운 물질이 들어 있는 정화조·탱크·암거·맨홀·피트의 내부
- (9) 곡물 또는 사료정장용 창고
- (10) 간장 또는 주류 등 발효 창고
- (11) 드라이아이스나 가스 사용시설
- (12) 유기용제 도장작업 등 충분히 건조되지 않은 밀폐 또는 통풍이 부족한 공간
- (13) 불활성의 기체가 들어있거나, 들어있었던 보일러·탱크 또는 반응탑 등 시설의 내부
- (14) 폐수 및 폐기물 처리장 또는 보관시설
- (15) 가스취급시설 또는 반응장치 시설
- (16) 기타 통풍이 부족한 공간 등

2) 산소결핍 사고의 원인분석

각종 산소결핍관련 사고들을 토대로 산소결핍 또는 유해가스에 의한 질식의 사고사례를 분석하면 다음과 같은 공통된 원인으로 분류되었다.

- (1) 작업 공간에 환기가 불충분하거나 신선한 공기를 충분히 공급하지 않아 산소의 부족이나 유해가스의 농도가 높은 경우
- (2) 작업 전 산소농도와 유해가스 등 작업환경을 조사하여 대책을 세우지 않은 상태에서 산소결핍 또는 유해 작업 장소에 들어갔을 경우
- (3) 산소결핍 또는 유해가스 등 위험이 있는 곳에서 송기마스크나 공기호

흡기 등 호흡용 보호구를 착용하지 않고 작업하였을 경우

- (4) 사고 발생시 구조자가 공기호흡기를 사용하지 않았거나 구조작업 안전 규칙을 이행하지 않았을 경우
- (5) 작업장에 충분한 환기를 통한 적절한 송기작업이 지속적으로 유지·관리 되어있지 않을 경우
- (6) 관계자가 산소결핍에 대하여 교육을 받지 않아 충분한 지식을 갖고 있지 않아 적절한 대응을 못한 경우
- (7) 부식 또는 부패나 공기 이외의 기체(메탄, 질소, 탄산가스 등)에 의한 치환으로 공기 중의 산소비가 낮았을 경우
- (8) 밀폐작업 등 산소결핍 관련 작업 안전수칙을 준수하지 않은 경우

3) 산소결핍 작업의 재해 예방대책

(1) 작업 공간 내 작업환경 확인

사고원인은 작업 공간 내 환기 부족으로 산소결핍 또는 유독가스 급성중독이었으며, 안전작업 교육 미흡으로 대처능력 부족과 밀폐 공간 내 환경측정 없음으로 산소농도 또는 유해가스의 상황인식이 불가하였으며 특히 산소결핍 상황이나 N₂, CO₂, 아르곤, 메탄가스 등은 무색, 무취, 무감각에 따른 심각한 위험성 감지 불가하였으며, 비상시 응급조치 및 대응방법의 미흡에 대한 개선이 필요

(2) 충분한 환기

환기는 산소결핍 또는 유해가스로부터의 사고방지를 위해 가장 중요한 대책으로 작업환경 내 어떠한 요인에 의해 산소농도가 저하되더라도 환기를 충분히 한다면 안전한 산소농도를 유지할 수 있다. 일반적으로 작업 공간 내에 작업자

들을 출입시키기 전에 충분한(기적의 5배 이상) 환기를 통하여 산소농도가 18%이상임을 확인 후 출입토록 하고, 작업 중에도 산소농가 18%이상 유지되도록 확인하며 송기를 계속한다.

(3) 보호구 착용 또는 송기구 설치

산소 결핍 또는 유해가스로부터의 사고를 방지하기 위한 보호구로는 송기마스크, 산소호흡기 등의 호흡용 보호구의 착용이나 송기장치를 이용 작업공간에 충분한 공기를 공급하여야 한다. 또한 작업장소가 추락, 전도의 위험이 있을 경우는 추락, 전도되지 않도록 구명줄을 착용

(4) 산소결핍 예방 교육

국내외적으로 동종 재해는 6-8월에 전체의 50% 발생하며 업종은 건설업에서 40%, 장소는 맨홀 50%, 원인은 산소결핍이 가장 많았으며 (40%), 기타 가스(H₂S, CO, 질소, 아르곤 등) 및 환경적 요인(내부 온도, 바닥 물 익사, 구토 물에 의한 기도 막힘)도 크게 작용하는 것으로 나타났으며, 특히 사망자 중 산소결핍 재해예방 교육 이수자 매우 미흡(3%수준)한 실정으로 나타나 교육대상 및 시기, 범위 등에 대한 고려가 필요

(5) 적정인력 배치 및 인원 점검

산소결핍 위험작업에서는 필히 관리감독자를 배치시키고 작업자의 적정인력으로 구성 후 작업에 임해야 하며, 비상 연락 체계를 갖추고 입·출입 시에는 반드시 인원을 점검하며 문제점이 발견될 경우 신속한 응급조치 체제 구축

(6) 관계 근로자 외 출입금지

산소결핍 이나 유해가스 취급의 위험작업 장소에는 외부인의 출입을 금지하며,

그 내용을 게시하는 등 출입 통제를 철저히

(7) 연락설비 설치

산소결핍위험작업장과 외부의 관리감독자 사이에 상시 연락을 취할 수 있는 설비(유선 설비, 무전기 등) 등을 설치

(8) 산소결핍 또는 위험 상황시 대피

작업환경 측정결과 산소결핍이나 유해가스로부터의 우려사항이 있을 때에는 즉시 작업을 중단하고 근로자를 대피

(9) 대피용 기구의 비치

공기호흡기, 사다리 및 섬유로프 등 비상시 근로자를 피난·구출하기 위하여 필요한 기구를 비치

(10) 안전담당자 배치

안전담당자는 근로자가 산소 결핍된 공기를 흡입하지 않도록 작업시작 전에 작업방법 결정 및 작업을 지휘를 하고, 작업장소의 공기 중 산소농도를 작업시작 전에 측정한다. 또한, 산소농도 측정기구·환기장치 또는 공기호흡기 등의 기구, 설비를 작업시작 전에 점검하고, 필요시 근로자에게 공기호흡기 등 호흡용 보호구 착용을 지도 감독

(11) 응급조치

작업시 유해가스에 의한 질식증상이나 근로자의 산소결핍증 등 이상이 있을 경우 즉시 응급조치 및 의사의 진찰을 받도록 함

(12) 제도개선

산소결핍 규제는 한국과 일본은 “산소 18 %이하”, 미국 “19.5 %이하”, 캐나다 “18.5 %이하”, 영국과 호주의 경우 “산소 부족으로 야기될 수 있는 환경” 또는 “밀폐 또는 위험장소” 로 규정하고 있어, 우리나라의 경우도 사고다발의 동종 재해 예방을 위해 규제기준의 강화를 통한 산소결핍장소의 경각심 고취와 산소 결핍 위험작업 및 교육 대상 범위의 확대를 고려할 필요가 있음

3. Rat를 이용 산소결핍과 환경조건 변화에 따른 생체영향 규명

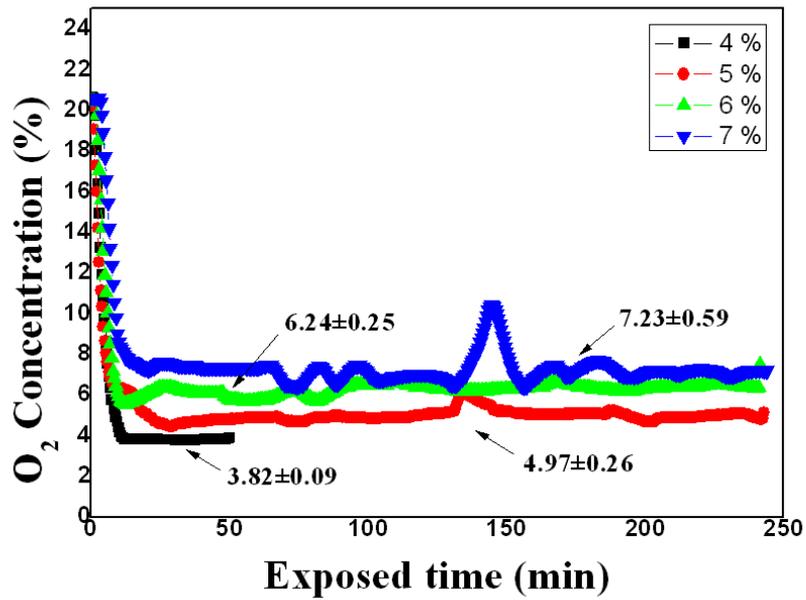
1) 산소농도 변화에 따른 치사 및 운동성 영향 시험결과

각 산소 농도별 SD rat 수컷 10마리를 1군으로 하여 산소농도 변화에 따른 운동성의 변화와 치사율을 시험하였다. 산소결핍 노출은 4시간, 노출시험 후 회복 및 임상관찰은 48시간으로 하였으며, 산소농도 조절은 청정 사육실의 실내공기(산소 약 21%)와 질소가스(순도 98%이상)를 이용(100 L/min 수준) 상대적으로 산소농도를 조절하며 실험동물의 임상증상(구토, 운동성 변화, 생사 유·무 등)을 관찰하였다.

시험결과 흡입챔버 내 산소시험 농도는 그림 1과 같이 노출 10분 이내(8-12분)에 목표설정 농도에 달하였으며(95%) 노출 시간(4시간) 중 흡입챔버 내 기중 산소의 농도를 측정된 결과는 Table 7과 같았다. 또한 노출시간별 실험동물의 운동성 변화는 그림 1과 같았으며, 산소결핍시험 노출 초기에는 노출전보다 실험동물의 운동성이 활발하였으나 시험물질 노출 20-30분 후부터는 운동성이 현격히 저하되었으며 산소결핍에 의한 사망동물의 경우 일부는 사진 8과 같이 고환의 부종현상도 관찰되었다.

<Table 7> 시험군별 챔버 내 공기 중 산소농도 측정결과

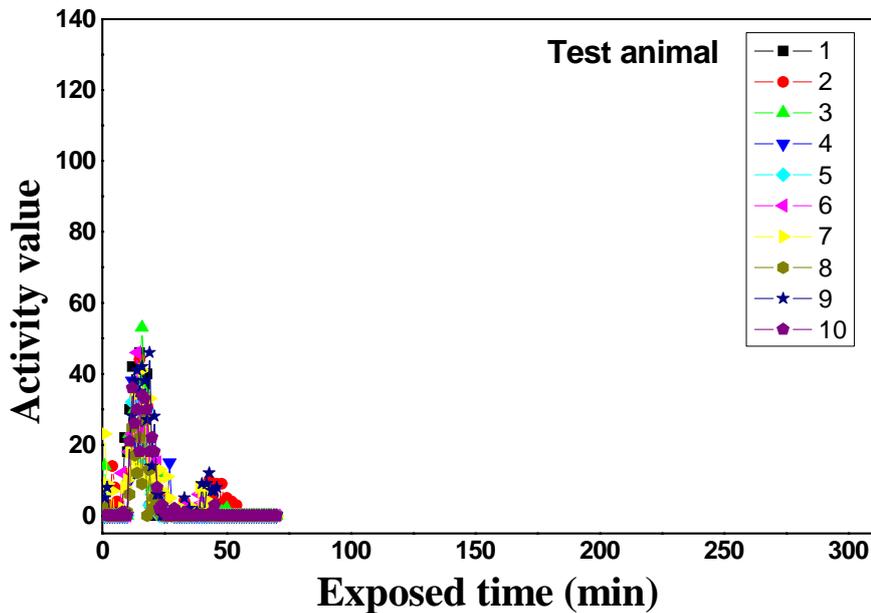
산소 노출군	최대 농도(%)	최소 농도(%)	Mean±S.D.(%)	비고
4 % 군	4.38	3.77	3.82±0.09	
5 % 군	6.07	4.45	4.97±0.26	
6 % 군	6.70	5.55	6.24±0.25	
7 % 군	10.41	6.39	7.23±0.59	



[그림 1] 노출시간에 따른 각 시험군 별 챔버 내 산소농도

(1) 산소 4%에서의 임상 및 운동성 영향

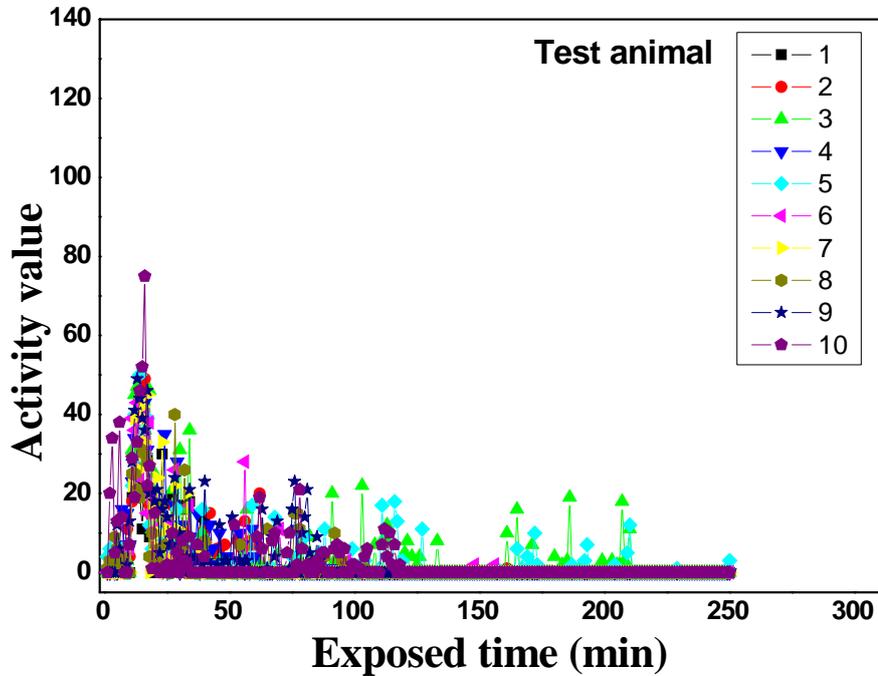
사용된 실험동물의 체중은 394.6 ± 13.02 g이었으며 산소 4% 노출시험결과 그림 2와 같이 초기에는 운동성이 활발하였으나 15분경과 후 운동성 둔화 또는 실신하였으며, 40분 후 10마리 중 5마리 사망, 45분 후 2마리 추가, 47분 후 10마리 모두 사망하였으며, 산소농도 저하에 따라 운동성 둔화 및 실신상태에서 사망하였으며, 구토나 경련, 출혈 등 임상 또는 행동학적 특이적 증상은 없었으나 사진 8과 같이 일부 고환의 부종현상이 발생되었고 산소 4% 환경에서의 rat의 치사율은 100%였다.



[그림 2] 산소농도 4%수준에서의 시간 경과별 rat의 운동성 변화

(2) 산소 5%에서의 임상 및 운동성 영향

사용된 실험동물의 체중은 408.04 ± 16.41 g이었으며 산소결핍 실험결과 그림 3과 같이 초기에는 운동성이 활발하였으나 20분 후 운동성 둔화 또는 실신하였으며, 40분 후 10마리 중 1마리 사망, 53분 후 1마리 추가사망, 70분 후 2마리 추가, 106분 후 추가 2마리, 120분 후 추가 1마리, 231분 후 추가 2마리 사망하였으며, 노출 4시간 동안 총 사망동물은 10마리 중 9마리였으며, 생존동물(1마리)은 48시간 후에는 운동성이 회복되었으나 체중은 감소(382.71 g)하였다. 사망 또는 생존동물에 있어 구토나 행동학적 특이한 임상증상은 없었으며 사진 8과 같이 고환의 부종현상이 발생되었으며 산소 5%에서의 rat의 치사율은 90%를 나타내었다.



[그림 3] 산소농도 5%수준에서의 시간 경과별 rat의 운동성 변화

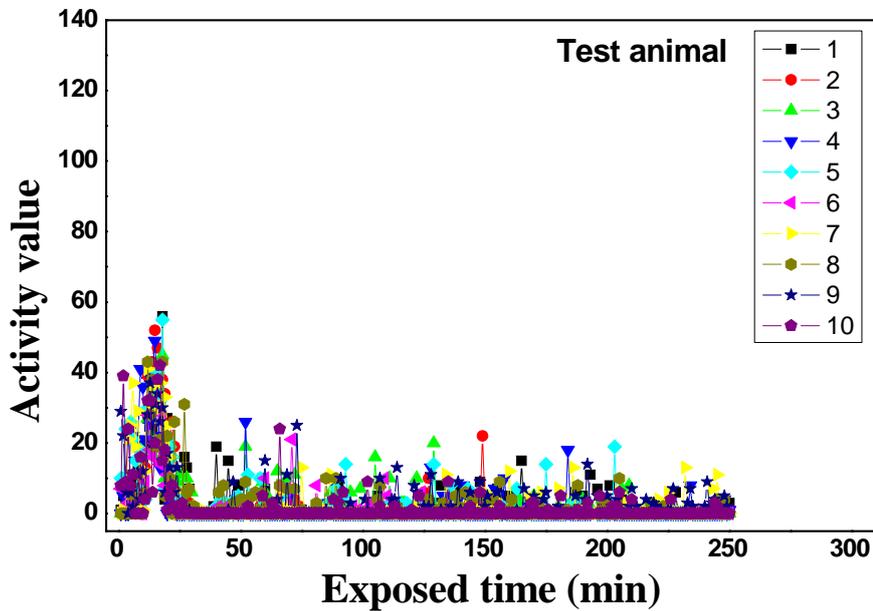
(3) 산소 6%에서의 임상 및 운동성 영향

사용된 실험동물의 체중은 409.11 ± 19.62 g이었으며 산소결핍 실험결과 흡입 챔버 내 질소가스 주입 10분 후에 시험농도(산소 6%)에 도달하였으며 15분 후 호흡 이상증상 및 움직임 둔화, 45분경과 후 실신하였으며, 90분경과시 가끔씩 재 움직임 또는 맥박속도가 빨라지는 실신상태를 유지하였으나 특이한 움직임 또는 이상소견은 없었으며, 4시간 노출시 10마리 중 2마리 사망(3시간에서 4시간 경과 시)하였다.

산소농도 저하에 따라 그림 4와 같이 운동성 둔화 및 실신상태에서 사망하였으나 구토나 행동학적 특이한 임상증상은 없었으며, 사망동물은 고환의 부종현상

이 발생되었으며 생존동물은 48시간 후 운동성이 회복하였으며 산소농도 6 %에서의 rat의 치사율은 20%였다.

동일한 조건에서 재현성 실험결과 산소농도 6% 재시험결과 산소농도 6%에서 3시간 후 10마리 중 1마리사망, 3시간 40분 후 추가 1마리 사망 등 4시간 노출 시험에서 10마리 중 2마리 사망(20 %치사) 하는 동일한 결과를 보였다.

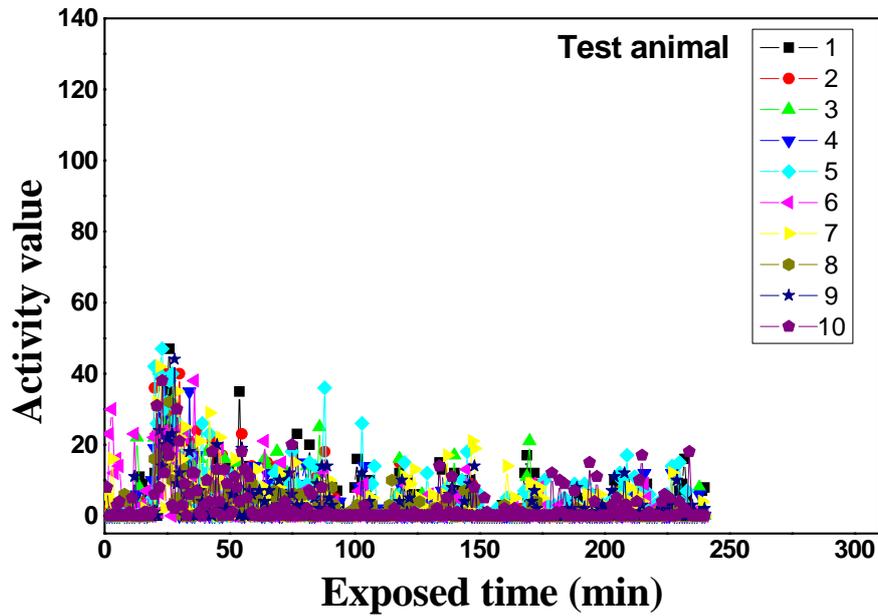


[그림 4] 산소농도 6 %수준에서의 시간 경과별 rat의 운동성 변화

(4) 산소 7%에서의 임상 및 운동성 영향

사용된 실험동물의 체중은 415.16 ± 31.53 g이었으며 산소결핍 실험결과 흡입 챔버 내 질소가스 주입 10분후에 시험농도(산소 7%)에 도달하였으며 그림 5와 같이 실험동물의 운동성이 증가되었으나 20분 후 호흡 이상증상 및 움직임의

둔화, 50분경과시 가끔씩 재 움직임 또는 실신상태를 유지하였으나 특이한 이상소견은 없었다. 4시간 노출경과 까지 사망동물은 없었으며 48시간 회복기간을 거친 결과 모두 회복되었다(체중 425.98 ± 24.99 g).



[그림 5] 산소농도 7%수준에서의 시간 경과별 rat의 운동성 변화

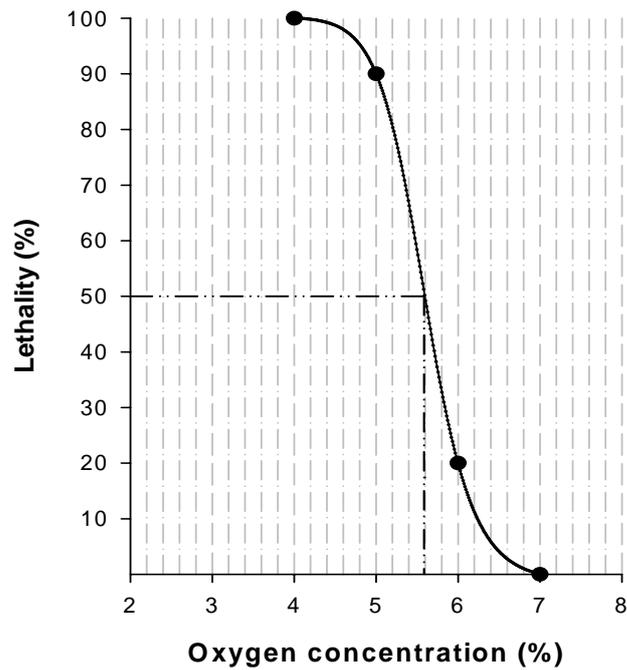


[사진 8] 산소결핍 사망 수컷 rat 고환의 부종현상

상기 시험결과를 토대로 산소농도에 따른 SD rat의 치사농도(Lethal Concentration, LC)는 양-반응(Dose-Response)의 그래프로 표시하면 그림 6과 같이 나타났으며 기중 산소농도의 과반수치사농도 $LC_{50}(\text{rat}, 4\text{hr})$ 은 5.5%로 산출되었다. 단, 사망동물의 판단은 노출시간 4시간 및 노출 후 21% 산소의 일반 사육실의 환경에서 48시간 회복기간을 거쳐 사망하는 동물을 포함하였다.

<Table 8> 시험군별 챔버 내 산소농도에 따른 사망동물 수와 치사율

산소 노출군	산소농도(%)	시험 동물 수	사망 동물 수	치사시간	치사율
4 %군	3.82±0.09	10마리	10마리	50분 이내	100 %
5 %군	4.97±0.26	10마리	9마리	230분 이내	90 %
6 %군	6.24±0.25	10마리	2마리	240분 이내	20 %
7 %군	7.23±0.59	10마리	0마리	240분 이내	0 %

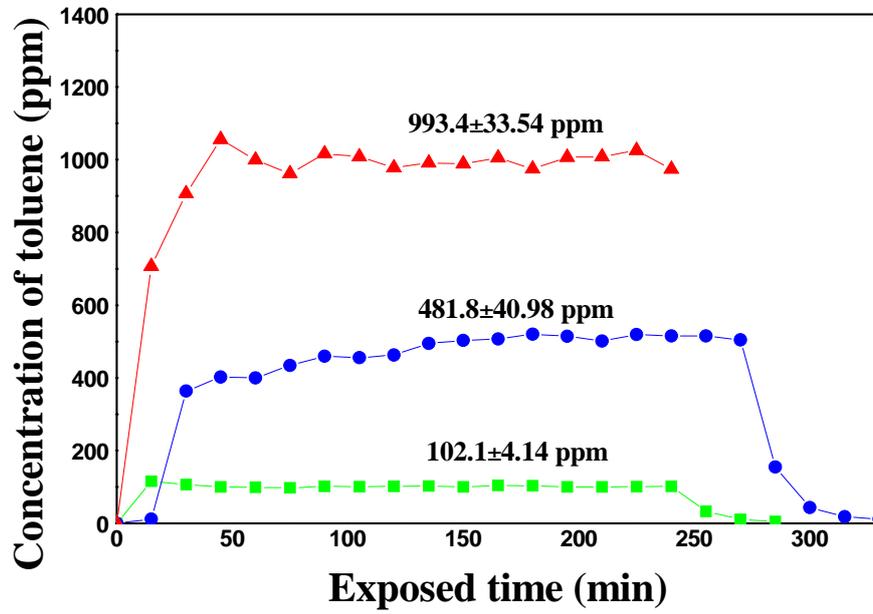


[그림 6] rat의 산소농도와 치사율의 양-반응(Dose-Response) 관계

2) 산소결핍 환경에서 톨루엔 노출에 따른 임상 및 운동성 영향

산소 6% 환경에서 톨루엔의 노출에 따른 운동성 및 치사농도의 영향을 평가하기 위해 톨루엔 노출 농도군 별 rat 수컷 10마리 1군으로 하여 톨루엔 농도 변화(100, 500, 1,000 ppm)에 따른 운동성의 변화와 치사율을 시험하였다. 노출시간은 4시간, 노출시험 후 회복기간은 48시간으로 하였으며 노출 및 회복기간 중 실험동물의 임상증상(구토, 운동성 변화, 생사 유·무 등)을 관찰하였다.

시험결과 각 군별 흡입챔버 내 톨루엔 및 산소노출의 환경 조건과 사망동물 수는 그림 7 및 Table 9와 같았다. 산소 6% 환경에서 톨루엔 100 ppm노출군의 경우 노출 3-4시간에 2마리 사망하였고(20%치사), 500 ppm의 경우 노출시간 3-4시간에 1마리, 회복 1시간 후 1마리 사망(20%치사), 1,000 ppm군의 경우 3-4시간에 2마리 사망(20%치사)하였으며 나머지 생존동물은 48시간 회복 후 특이적 증상이나 사망동물은 없었다.

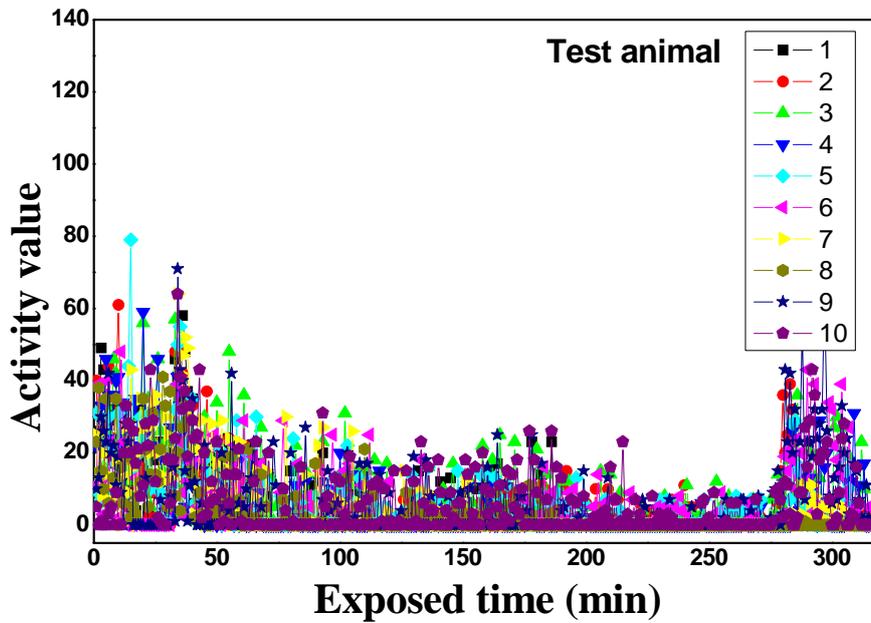


[그림 7] 노출 시간별 흡입챔버 내 톨루엔 농도 변화

<Table 9> 톨루엔 시험군별 챔버 내 노출 농도와 사망동물 수

시험 군	톨루엔 농도 (ppm)	산소농도 (%)	시험동물 수	사망 수	치사율
100 ppm군	102.09±4.14	6.01±0.23	수컷 10마리	2마리	20 %
500 ppm군	481.83±40.98	6.04±0.17	수컷 10마리	2마리	20 %
1,000 ppm군	993.4±33.54	6.01±0.20	수컷 10마리	2마리	20 %

또한 시험물질 노출시 실험동물의 운동성은 산소 결핍시험에서와 같이 초기에는 운동성이 향상되었으나 시간이 경과(20분정도) 할수록 운동성이 저하되었으며, 1,000 ppm군의 경우 그림 8과 같이 4시간 노출시험 직후 생존동물은 1시간 이내 운동성이 회복되었으며, 6% 산소결핍 상화에서 100, 500, 1,000 ppm의 툴루엔 농도가 rat의 치사율의 상승작용을 일으키지 않는 것으로 확인되었다.



[그림 8] 툴루엔 1,000 ppm군의 노출시간별 운동성 변화

3) 산소결핍 환경에서 습도변화에 따른 임상 및 운동성 영향

산소결핍(산소 6%) 환경에서 습도의 변화에 따른 실험동물의 운동성과 치사농도의 영향을 조사하기 위해 습도별 rat 수컷 10마리를 한 군으로 구성하여 습도 변화(상대습도 20%, 60%, 90%)에 따른 운동성의 변화와 치사율을 시험하였으며, 노출시간은 4시간, 회복기간 48시간으로 하였으며 노출 및 회복기간 중 실험동물의 임상증상(구토, 운동성 변화, 생사 유·무 등)을 관찰하였다.

시험결과 각 군별 흡입챔버 내 습도 및 산소노출의 환경 조건과 사망동물 수는 Table 10과 같았다. 습도 20% 군의 경우 노출 2-3시간에 1마리, 3시간-4시간에 1마리 사망하였고(20%치사), 60%군의 경우 노출시간 2-3시간에 2마리 사망(20%치사), 90%군의 경우 2-3시간에 1마리, 3-4시간에 1마리 사망(20%치사)하였으며 나머지 생존동물은 48시간 회복기간 중 특이적 증상이나 사망동물은 없었다.

<Table 10> 습도 시험군별 챔버 내 노출 농도와 사망동물 수

시험 군	상대습도 (%)	산소농도 (%)	시험동물 수	사망 수	치사율
20 %군	25.4±7.5	6.24±0.25	수컷 10마리	2마리	20 %
60 %군	59.22±10.14	6.14±0.28	수컷 10마리	2마리	20 %
90 %군	86.41±10.69	6.01±0.18	수컷 10마리	2마리	20 %

또한 시험물질 노출시 실험동물의 운동성은 산소 결핍시험에서와 같이 초기에는 운동성이 향상되었으나 시간이 경과(20분정도) 할수록 운동성이 저하되었으며 48시간 후 운동성이 회복되었다. 따라서 본 시험결과를 토대로 하면 산소결

핍 상황에서 습도변화에 따른 특이적 임상증상 변화나 치사율의 상승효과는 없는 결과로 나타났다.

4) 산소결핍 환경에서 온도변화에 따른 임상증상 및 운동성 영향

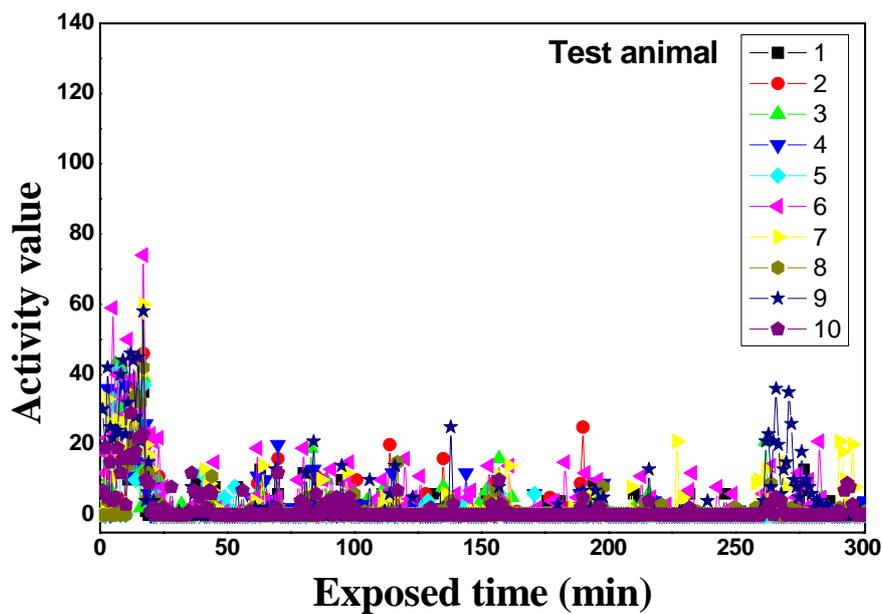
산소결핍(산소 6%) 환경에서 시험 온도 별 rat 수컷 10마리를 한 군으로 구성하여 온도 변화 (20℃, 30℃, 40℃)에 따른 운동성의 변화와 치사율을 시험하였다. 시험조건에서 노출시간은 4시간, 노출시험 후 회복기간은 48시간으로 하였으며 노출 및 회복기간 중 실험동물의 임상증상(구토, 운동성 변화, 생사 유·무 등)을 관찰하였다.

시험결과 각 군별 흡입챔버 내 온도 및 산소농도의 환경 조건과 사망동물 수는 Table 11과 같았다. 온도 20℃군의 경우 노출 2시간에 1마리, 2-3시간에 1마리 사망하였고(20%치사), 30℃군의 경우 노출시간 1-2시간에 1마리 사망, 2-3시간에 7마리사망(70%치사), 3-4시간에 1마리 사망(90%치사), 40℃ 군의 경우 노출 30분-1시간 경과 후 3마리 사망, 1시간-2시간 경과 6마리, 2-3시간 경과 후 1마리 사망(100%치사)하였으며, 20 및 30℃ 시험에서의 생존동물(11마리)은 48시간 회복기간 중 특이적 증상이나 사망동물은 없었다.

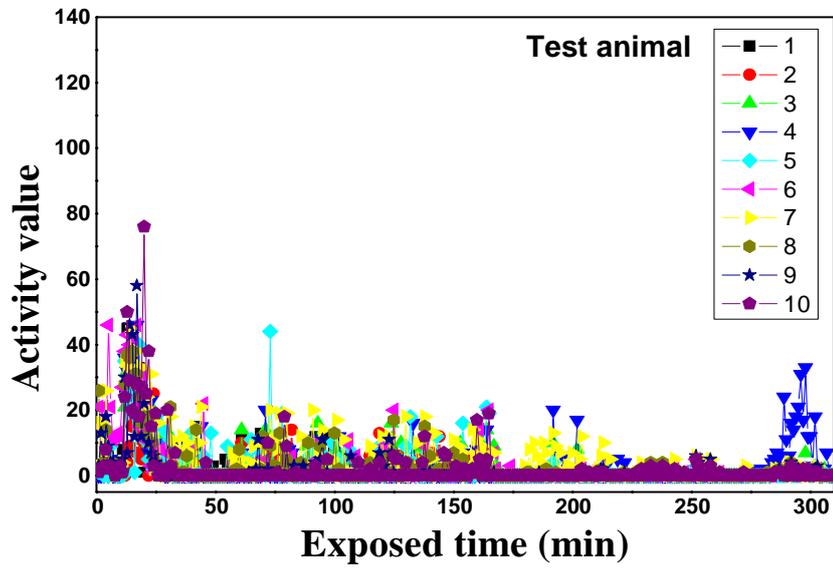
<Table 11> 온도 시험군별 챔버 내 노출 농도와 사망동물 수

시험 군	온도 (℃)	산소농도 (%)	시험동물 수	사망 수	치사율
20℃군	23.59±0.24	6.24±0.25	수컷 10마리	2마리	20 %
30℃군	32.31±1.30	6.09±0.29	수컷 10마리	9마리	90 %
40℃군	40.39±0.88	5.96±0.22	수컷 10마리	10마리	100 %

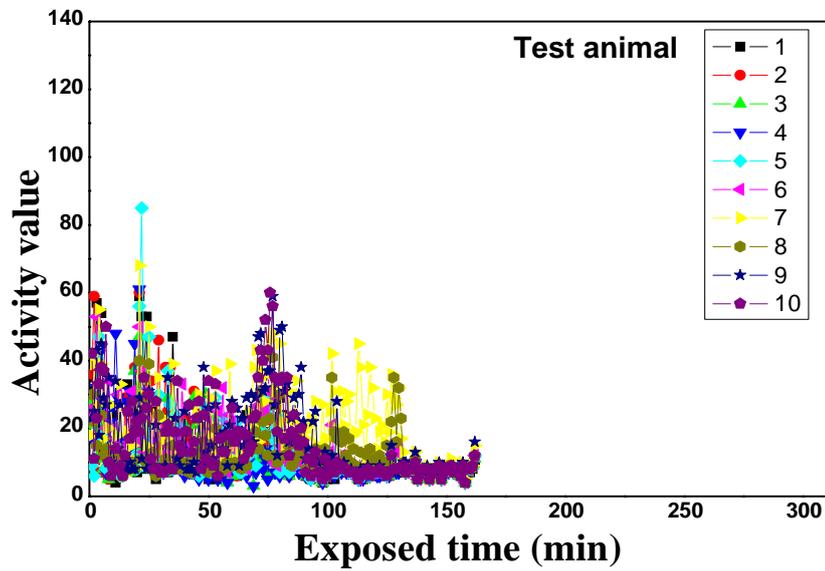
또한 시험물질 노출시 실험동물의 운동성은 그림 9, 10, 11과 같이 시험시작 초기(30분 이내)에는 갑자기 운동성이 증가하였으나 이후 실신 및 운동성이 둔화되었고, 사망동물 발생시 간혹 경련을 일으켜 운동량이 증가하였으며 40℃군의 경우 시험대상 10마리 모두가 초기부터 운동성이 강하여 120분까지 지속되었으며(중간 중간에 사망동물 발생) 최후 동물 1마리는 130분까지 경련 및 강한 활동을 하다 160분경 사망하였고 20℃ 및 30℃군의 생존동물은 48시간 회복기간 경과 후 운동성이 회복되었다. 즉, 산소결핍 상황에서 온도와 치사농도는 밀접한 관계가 있었으며 온도 상승의 경우 치사율도 증가하는 현상을 보였다.



[그림 9] 20℃ 노출군의 노출시간 경과별 rat의 운동성 변화



[그림 10] 30°C 노출군의 노출시간별 rat의 운동성 변화



[그림 11] 40°C 노출군의 노출시간별 rat의 운동성 변화

5) 산소결핍 환경에서 CO₂ 노출에 의한 임상증상 및 운동성 영향

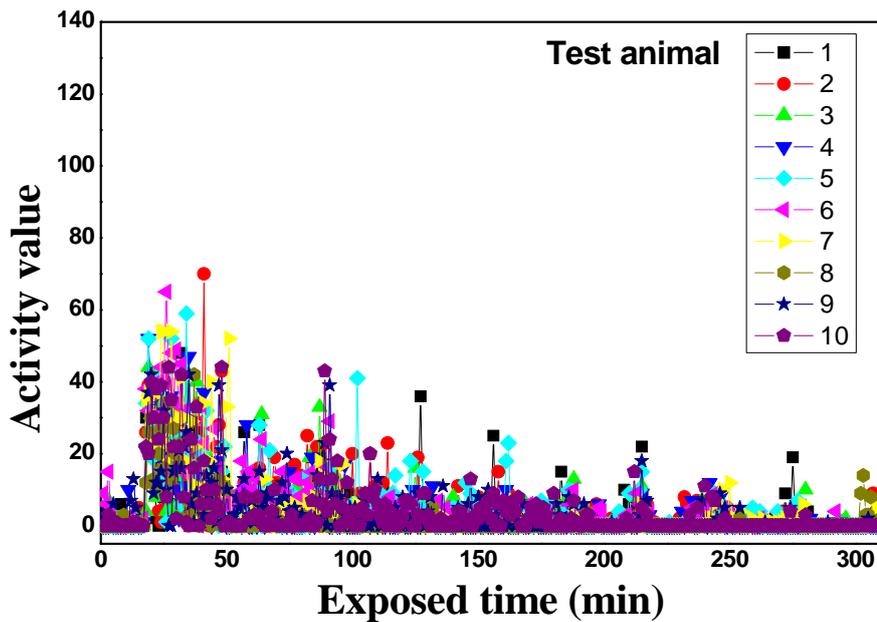
산소결핍(산소 6%) 환경에서 CO₂ 노출에 따른 영향을 관찰하기 위해 rat 수컷 10마리 1군으로 하여 CO₂ 노출농도 변화(2%, 4%, 8%)에 따른 운동성의 영향과 치사율을 시험하였다. 시험물질 노출시간은 4시간, 노출시험 후 회복기간은 48시간으로 하였으며 노출 및 회복기간 중 실험동물의 임상증상(구토, 운동성 변화, 생사 유·무 등)을 관찰하였다.

시험결과 각 군별 흡입챔버 내 CO₂농도 및 산소노출의 환경 조건과 사망동물 수는 Table 12와 같았다. 시험에 사용된 시험물질은 표준가스(리가스주식회사, 순도 99.98%이상)를 사용하였으며 시험물질 노출기간 중 CO₂ 노출 군별(2%, 4%, 8%) 사망동물은 없었으며, 4시간 노출시험 후 생존동물에 대해 48시간 회복기간을 가졌으나 특이적 증상이나 추가적 사망동물은 없었다.

<Table 12> CO₂ 노출 시험군별 챔버 내 노출 농도와 사망동물 수

시험 군	CO ₂ 농도(%)	산소농도 (%)	시험동물 수	사망 수	치사율
2 %군	2.00±0.01	6.015±0.005	수컷 10마리	0마리	0 %
4 %군	4.00±0.01	6.02±0.02	수컷 10마리	0마리	0 %
8 %군	8.03±0.02	6.01±0.00	수컷 10마리	0마리	0 %
대조군	0.01이하	6.24±0.25	수컷 10마리	2마리	20 %

또한 시험물질 노출시 실험동물의 운동성은 그림 12와 같이 6% 산소결핍에서의 현상(노출 30분 후는 실신)과 달리 CO₂ 노출에 따라 운동성의 급격한 저하를 보였으나 4시간 노출 종료까지 실신상태에 머물러 있었으며(움직임이 조용한 상태), 또한 그림 12의 운동성 측정 자료에서와 같이 치사직전의 활동성 상승(괴로워하는 상황)이 현격히 적었으며 (다른 조건의 실험에서는 개체별 사망 조건에 도달하였을 때 경련을 일으키며 일시적으로 활동성을 증가하다가 사망하였음), 시험물질 노출군 모두 사망 수는 없었다. 생존동물은 48시간 회복기간을 거쳐 모두 운동성이 회복되었으며 본 시험결과를 기준으로 하면 CO₂ 노출이 산소결핍상황에서의 치사농도 감소작용을 일으키는 것으로 나타났다.



[그림 12] CO₂ 2% 노출군의 노출시간별 rat의 운동성 변화

6) 산소결핍 환경에서 H₂S 노출에 의한 임상증상 및 운동성 영향

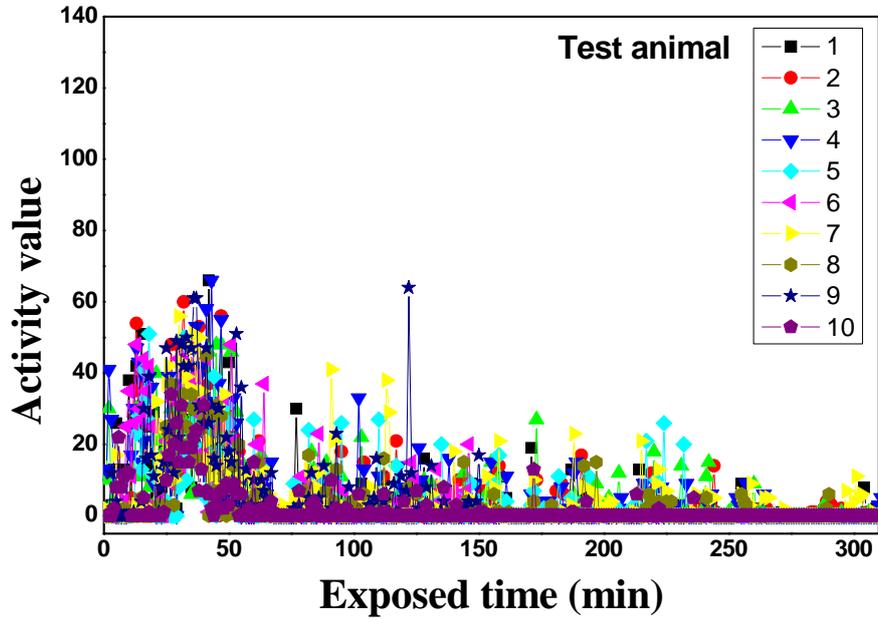
산소결핍(산소 6.03%) 환경에서 H₂S노출에 따른 영향을 관찰하기 위해 rat 수컷 10마리를 한 군으로 하여 H₂S 노출농도 변화(20, 100, 500 ppm 및 350 ppm)에 따른 운동성의 영향과 치사율을 시험하였다. 시험물질 노출시간은 4시간, 노출시험 후 회복기간은 48시간으로 하였으며 노출 및 회복기간 중 실험동물의 임상증상(구토, 운동성 변화, 생사 유·무 등)을 관찰하였다.

시험결과 각 군별 흡입챔버 내 H₂S 및 산소농도와 사망동물 수는 Table 13과 같았으며, 시험에 사용된 시험물질은 Table 13의 표준가스(리가스 주식회사)를 사용하였다. 시험물질 노출은 4시간으로 하고 노출 완료 후 48시간 회복시간을 가졌으며, 시험물질 노출기간 중 사망동물은 20 ppm군의 경우 10마리 중 노출 개시 2시간 후부터 4시간까지 4마리 사망(40%)하였으며, 100 ppm군의 경우 특이하게 H₂S의 농도가 높으나 10마리 중 사망동물은 없었으며, 500 ppm의 경우 노출시작 1시간 40분부터 실험동물이 사망하여 3시간 40분까지 10마리 중 10마리 모두 사망하였다. 그리고 각 군별 4시간 노출시험 후 생존동물에 대해 48시간 회복기간을 가지며 관찰하였으나 특이적 증상이나 추가적 사망동물은 없었다. 그러나 100 ppm군의 경우 특이하게 20 ppm노출군(4마리 사망)에 비해 사망동물이 없어 추가 실험으로 하여 H₂S 350 ppm(산소 6.01%)으로 실험한 결과 노출시작 2시간 50분부터 4시간 노출 종료까지 3마리 사망하였다. 따라서 100ppm군의 경우 동물실험에서 나타날 수 있는 특이적 경우로 해석되었다.

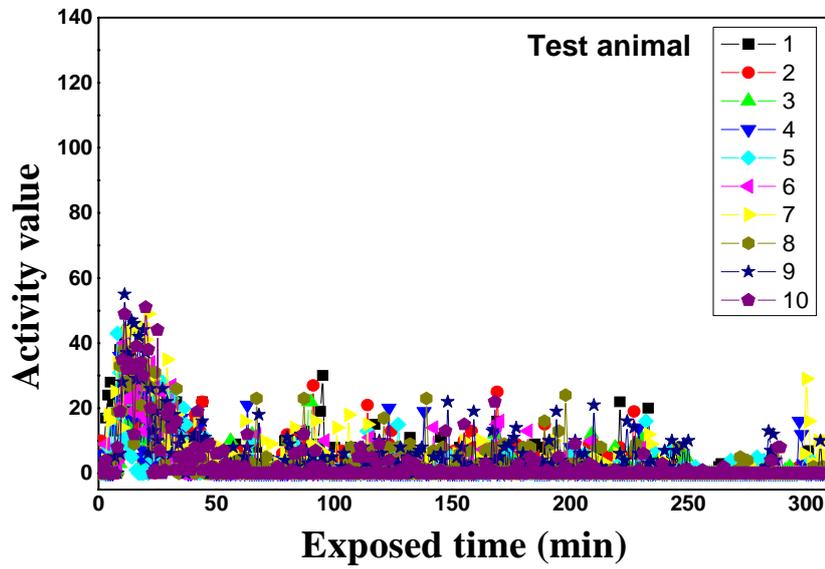
<Table 13> H₂S 노출 시험군별 챔버 내 노출농도와 사망동물 수

시험 군	H ₂ S 노출농도	산소농도(%)	시험동물 수	사망 수	치사율
20 ppm군	20.15±0.05 ppm	6.01±0.02	수컷 10마리	4마리	40 %
100 ppm군	102.5±0.5 ppm	6.02±0.02	수컷 10마리	0마리	0 %
500 ppm군	493.5±3.5 ppm	6.01±0.01	수컷 10마리	10마리	100 %
350 ppm군	346.5±3.5 ppm	6.01±0.00	수컷 10마리	3마리	30 %

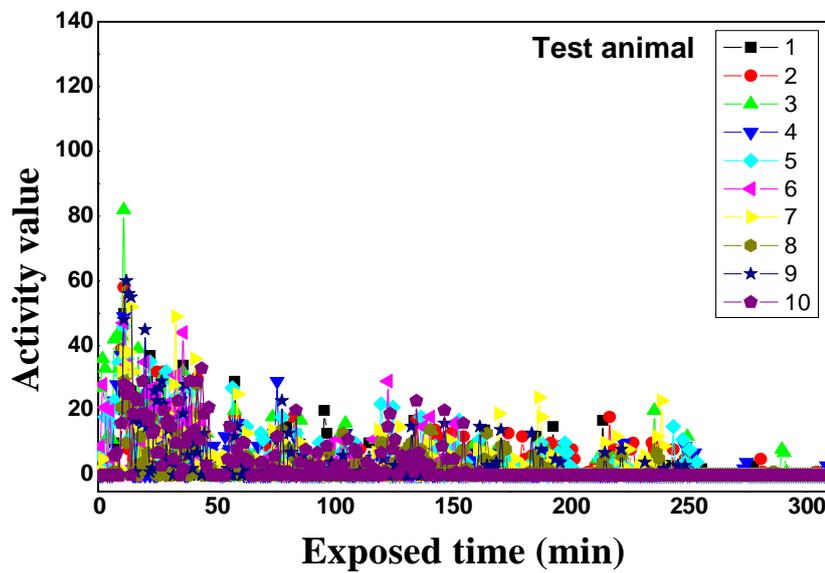
또한 시험물질 노출시 실험동물의 운동성은 그림 13-16과 같이 H₂S 노출에 따라 운동성의 급격한 저하를 보였다. 시험물질 노출 시작부터 4시간 노출 종료까지 운동성이 현격히 저하되고 실신상태에서 머물러 있었으며(가끔은 일부 움직임), 4시간(240분) 노출 종료 후 서서히 회복 상태를 보였으며 1시간 후 생존동물의 일부는 그림 13에서와 같이 활발한 활동을 보였으며, 4시간 회복기간 중 추가적 사망 동물이나 특이적 임상 증상은 없었다.



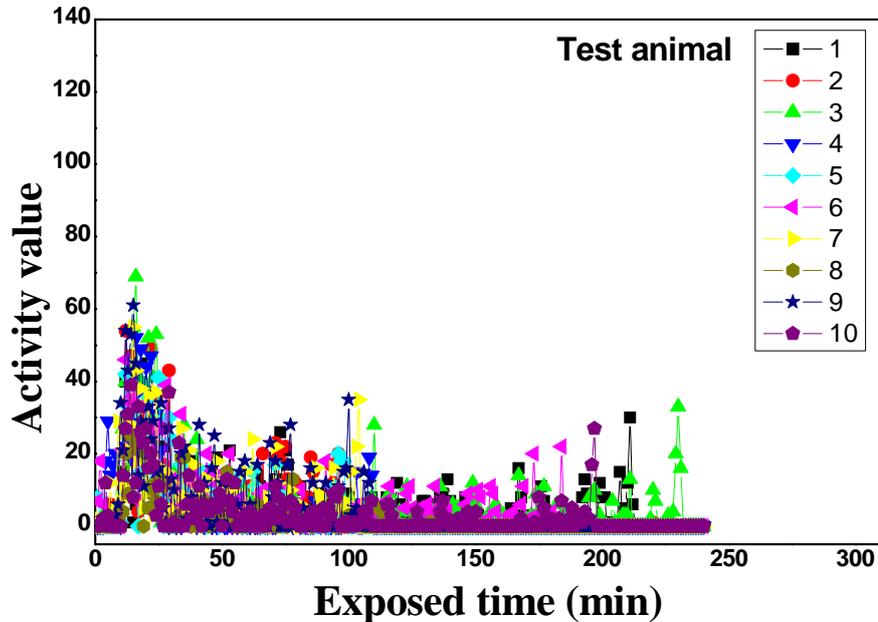
[그림 13] H2S 20 ppm 노출군의 시간 경과별 rat의 운동성 변화



[그림 14] H₂S 100 ppm 노출군의 시간 경과별 rat의 운동성 변화



[그림 15] H₂S 350 ppm 노출군의 시간 경과별 rat의 운동성 변화



[그림 16] H2S 500 ppm 노출군의 시간 경과별 rat의 운동성 변화

7) 산소결핍 환경에서 CO 노출에 의한 임상증상 및 운동성 영향

산소결핍(산소 6%) 환경에서 CO 노출에 따른 영향을 관찰하기 위해 rat 수컷 10마리를 한 군으로 하여 CO 노출농도 변화(300, 600, 1,200, 2,400 ppm)에 따른 운동성의 영향과 치사율을 시험하였다. 시험물질 노출시간은 4시간, 노출시험 후 회복기간은 48시간으로 하였으며 노출 및 회복기간 중 실험동물의 임상증상(구토, 운동성 변화, 생사 유·무 등)을 관찰하였다.

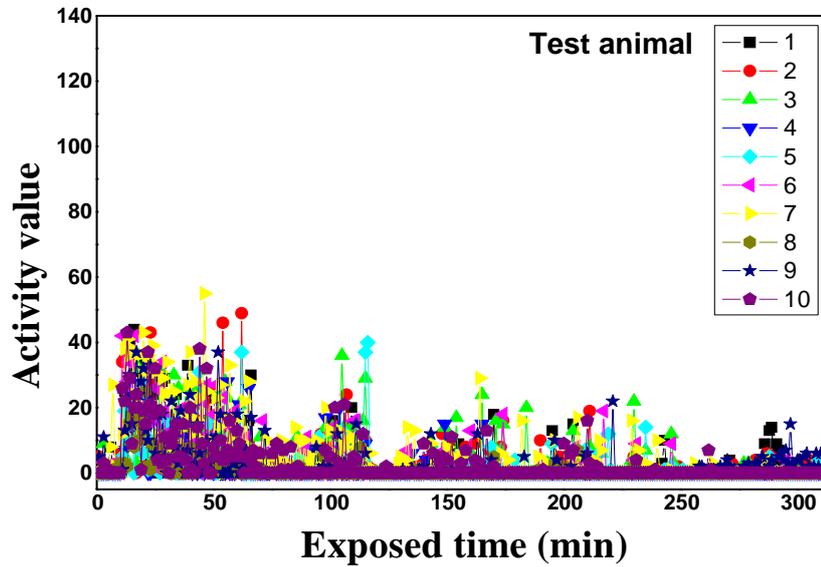
시험결과 각 군별 흡입챔버 내 CO 및 산소농도와 사망동물 수는 Table 13과 같았으며 시험에 사용된 시험물질은 Table 14와 같은 농도의 표준가스(리가스

주식회사)를 사용하였다. 시험물질은 4시간 노출, 48시간 회복시간을 가졌으며, 시험물질 노출기간 중 운동성변화는 그림 17-19와 같았으며 사망동물은 300 ppm군의 경우 10마리 중 노출개시 2시간 50분에 1마리 사망(40%)하였으며, 600 ppm군의 경우 노출시작 후 3시간 16분 경 1마리, 3시간 30분경 추가 1마리 사망하여 총 2마리 사망하였고, 1,200 ppm군의 경우 노출시작 58분경 1마리 사망을 시작으로 1시간45분까지 총 10마리 전량 사망, 2,400 ppm 경우 50분 이내 10마리 전량 사망하였다. 그리고 각 군별 4시간 노출시험 후 생존동물에 대해 48시간 회복기간을 가지며 관찰하였으나 특이적 증상이나 추가적 사망동물은 없었다.

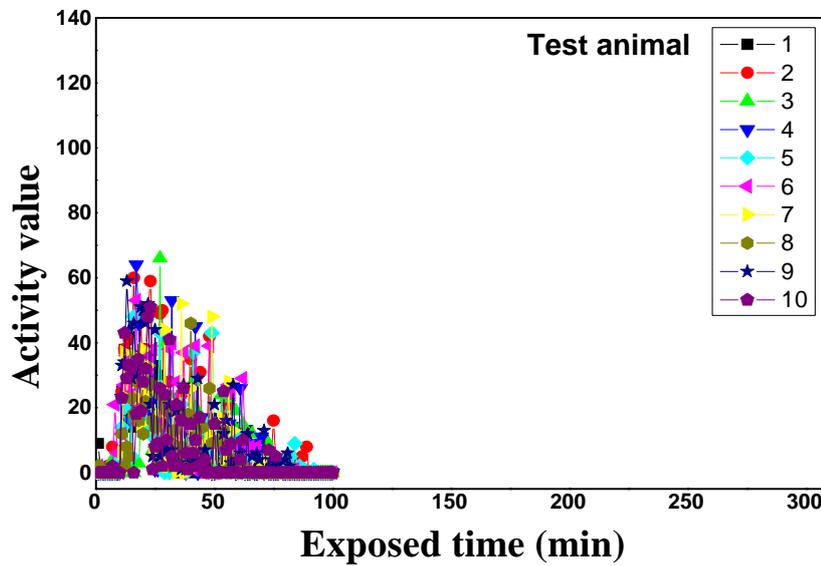
<Table 14> CO 노출 시험군별 챔버 내 노출 농도와 사망동물 수

시험 군	CO 노출농도	산소농도 (%)	시험동물 수	사망 수	치사율
300 ppm군	298.5±0.5 ppm	6.02±0.02	수컷 10마리	1마리	10 %
600 ppm군	601.0±3.0 ppm	6.02±0.02	수컷 10마리	2마리	20 %
1,200 ppm군	1,199±11 ppm	6.00±0.01	수컷 10마리	10마리	100 %
2,400 ppm군	2,405±15 ppm	6.12±0.02	수컷 10마리	10마리	100 %

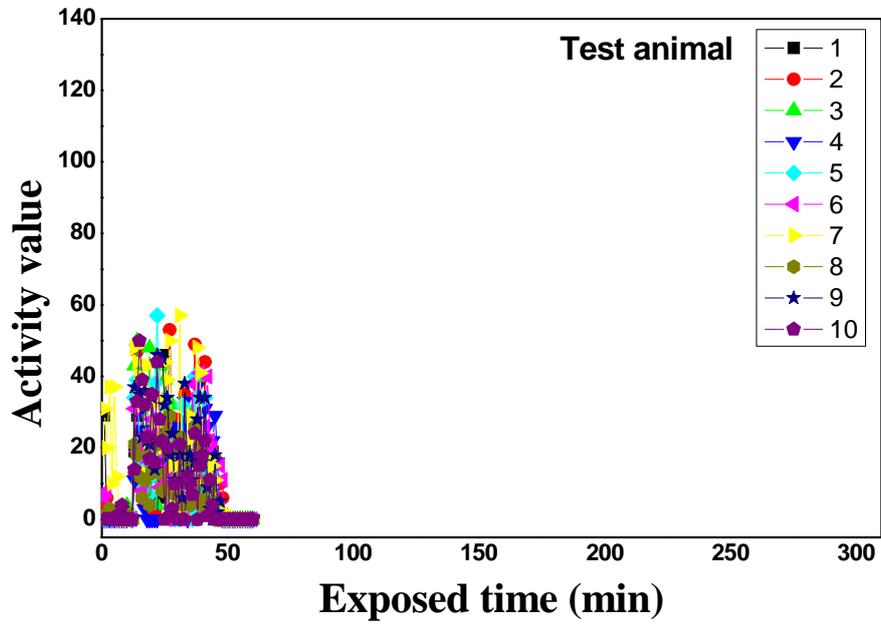
또한 시험물질 노출시 실험동물의 활동성은 그림 17-19와 같이 CO 노출에 따라 운동량의 급격한 저하를 보였다. 시험물질 노출 시작부터 4시간 노출 종료까지 운동성이 현격히 저하되고 실신상태에 머물러 있었으며(가끔은 일부 움직임), 4시간(240분) 노출 종료 후 서서히 회복 상태를 보였으며 1시간 후 생존동물의 일부는 그림 17에서와 같이 다시금 활동성을 보였으며, 4시간 회복기간 중 추가적 사망 동물이나 특이적 임상 증상은 없었다.



[그림 17] CO 300 ppm 노출군의 시간 경과별 rat의 운동성 변화



[그림 18] CO 1,200 ppm 노출군의 시간 경과별 rat의 운동성 변화



[그림 19] CO 2,400 ppm 노출군의 시간 경과별 rat의 운동성 변화

IV. 고 찰

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 원인으로서는 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.

산소는 상온·상압에서 무색, 무미, 무취의 기체로 표준상태에서 1ℓ의 무게는 1.429 g(공기기준), 물에 대한 용해도는 0℃에서 0.0491%, 20℃에서 0.0311%가 녹으며, 임계온도는 -118.8℃, 임계압력 49.7기압으로 액체·고체상태에서는 담청색, 비중 1.118(-183℃), 물과 알코올에 녹으며 산소 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 경과 되면 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(Rassler 등, 2007), 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(Rassler 등, 2007).

본 연구에서도 산소결핍에 의한 rat의 사망동물에서 사진 8과 같이 고환의 부종현상이 확인되었으며 Rassler 등(2007)의 연구와 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 장기화될 경우 폐 고혈압이 발생할 수 있다.

Morita(1998)의 연구에 의하면 N_2 , CH_4 , N_2O 의 가스를 사용한 흡입독성연구에서 실험동물 흰쥐의 호흡 정지는 4%의 O_2 와 80%의 가스 농도일 때 일어났으며, 개의 경우 사망농도는 O_2 의 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(Morita M, 1998). 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 흥부가 하늘을 향한 상태이면 구토물이 기관지 내로 흡입하여 질식사 하는 경우도 있으며, 엎드린 자세로 물이 고여 있는 곳에 쓰러졌을 경우 폐 내에 물을 흡입하여 익사한 것과 같은 결과가 되는 사례도 있다.

Table 15에서와 같이 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.

<Table 15> 일반 대기의 공기 조성

가 스 명	용 적 (%)	가스의 성질
질 소	78.09	불 연 성
산 소	20.95	조 연 성
알 곤	0.93	불 연 성
이산화탄소	0.03	불 연 성

출처: <http://www.gasdeco.co.kr>

최근 5년간 우리나라의 밀폐공간에서 산소부족 또는 유해가스 중독으로 사망하는 사례는 매년 30여명 수준이며, 지속적인 교육과 홍보로 산소결핍에 대한 대처능력은 향상되고 있으나, 밀폐공간에 대한 작업범위가 방대하여 아직도 교육을 받지 않은 사람이 많으며 또한 작업안전수칙을 이행하지 않아 사고가 지속적으로 발생하고 있다. 그 예로 하여 한국산업안전공단(2007) 자료에 의하면 2007년 산소결핍관련으로 8,500여명에 교육을 실시하였으나 사망자 31명중 교육을 받은 근로자는 극소수(1명)인 것으로 나타났다.

따라서 이러한 문제점들에 대한 개선으로 정부에서는 밀폐 공간 작업의 3대 안전수칙 준수를 지도하며, 밀폐 공간 질식재해의 30%이상을 차지하고 있는 건설현장을 중심으로 시, 군, 구 등 지방자치단체에 대해서도 맨홀공사의 발주에 대해서는 교육 및 기술지원을 통해 재해 예방에 기여하고 있으며 한국안전공단은 2007년 7월부터 경기도와 “밀폐공간 안전사고 예방지원 협약”을 체결하고 질식재해예방을 위하여 각종 기술 자료와 산소농도측정기, 환기팬, 공기호흡기 등의 무상대여 등의 기술지원과 집중적 교육지원을 통해 중대재해를 예방해나가고 있다(한국산업안전공단, 2007).

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(NIOSH, 1987).

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 만들

었다. 여기에는 밀폐공간을 3가지(Class A-Immediately Dangerous to Life/Health (IDLH); Class B-dangerous, but not IDLH; Class C-potentially hazardous)로 나누었고 Table 16 및 17과 같이 각각의 수준에서 고려해야 할 요인에 대한 체크리스트를 제공하고 밀폐공간에 있는 대기의 측정방법, 안전한 작업을 위한 절차, 보호구와 보호의에 대한 정보를 제공한다(NIOSH, 1979).

<Table 16> Confined space classification table

Parameters	Class A	Class B	Class C
Characteristics	immediately dangerous to life - rescue procedures require the entry of more than one individual fully equipped with life support equipment - maintenance of communication requires an additional standby person stationed within the confined space	dangerous, but not immediately life threatening - rescue procedures require the entry of no more than one individual fully equipped with life support equipment - indirect visual or auditory communication with workers	potential hazard - requires no modification of work procedures - standard rescue procedures - direct communication with workers, from outside the confined space
Oxygen	16% or less *(122 mm Hg) or greater than 25% *(190 mm Hg)	16.1% to 19.4% *(122 - 147 mm Hg) or 21.5% to 25% (163 - 190 mm Hg)	19.5% - 21.4% *(148 - 163 mm Hg)
Flammability Characteristics	20% or greater of LFL	10% - 19% LFL	10% LFL or less
Toxicity	**IDLH	greater than contamination level, referenced in 29 CFR Part 1910 Sub Part Z - less than **IDLH	less than contamination level referenced in 29 CFR Part 1910 Sub Part Z

*Based upon a total atmospheric pressure of 760 mm Hg (sea level)

**Immediately Dangerous to Life or Health - as referenced in NIOSH Registry of Toxic and Chemical Substances, Manufacturing Chemists data sheets, industrial hygiene guides or other recognized authorities.

출처: National Institute for Occupational Safety and Health

<Table 17> Checklist of consideration for entry, working in and exciting confined space

ITEM	CLASS A	CLASS B	CLASS C
1. Permit	X	X	X
2. Atmospheric Testing	X	X	X
3. Monitoring	X	O	O
4. Medical Surveillance	X	X	O
5. Training of Personnel	X	X	X
6. Labeling and Posting	X	X	X
7. Preparation			
Isolate/lockout/tag	X	X	O
Purge and ventilate	X	X	O
Cleaning Processes	O	O	O
Requirements for special equipment/tools	X	X	O
8. Procedures			
Initial plan	X	X	X
Standby	X	X	O
Communications/observation	X	X	X
Rescue	X	X	X
Work	X	X	X
9. Safety Equipment and Clothing			
Head protection	O	O	O
Hearing protection	O	O	O
Hand protection	O	O	O
Foot protection	O	O	O
Body protection	O	O	O
Respiratory protection	O	O	O
Safety belts	X	X	X
Life lines, harness	X	O	
10. Rescue Equipment	X	X	X
11. Recordkeeping/Exposure	X	X	

X - indicates requirement
O - indicates determination by the qualified person

출처: National Institute for Occupational Safety and Health

이러한 산소결핍에 의한 사망에 있어 그 원인들을 분석하여 보면 대부분 위험 상황을 예상 못하는 작업환경으로 인해 사망에 이르는 중대 사고로 발생되었다. 즉, 산소 결핍의 사망사고는 대부분 작업환경이 상온, 상압의 무색, 무취로 하여 냄새가 없으며 폭발이나 화재의 위험성이 감지되지 않아 일반 유독성가스

취급 장소에 비해 안전하다는 생각에 충분한 주의를 기울이지 않고 무의식적으로 접근하는 경향이 높고, 평소 산소 결핍의 상황이 생명에 치명적 영향을 준다는 안전교육의 미비 등으로 중대는 더욱 가중되고 있다.

사고사례 조사 결과에서도 휘발성 유기용제 가스나 황화수소, 메르캅탄 가스 등 냄새가 나는 유독성가스에 의한 사망보다는 질소 가스나 아르곤, 이산화탄소, 일산화탄소 등 무색, 무취의 가스들로 위험성이 없는 물질로 착각할 수 있으나 작업 공간 내 이들의 분포가 높을 경우 상대적으로 산소의 농도가 적어 산소 결핍에 의한 저산소성 혈액공급으로 인해 뇌세포의 파괴 및 피사의 과정을 거쳐 정신장애, 운동성 불가, 의식불명 등 치명적 재해로 발전할 수 있다.

환경별 산소 소모현상을 보면 유기물이 침적된 밀폐 공간인 지하 맨홀이나 분뇨탱크, 폐수 또는 하수처리설비 등에는 습도와 온도, 유기물의 영양분등으로 미생물의 번식이 쉽다. 이러한 미생물의 증식으로 인해 소모되는 산소 소비량은 온도 및 습도, 영양분(유기물)의 조건에 따라 매우 강력하고 빠르게 진행되며 이는 Table 18에서와 같이 수십 배에서 수천 배에 이른다. 특히 분뇨나 고농도 유기물의 폐수, 펄프액등은 미생물의 번식이 매우 쉬우며 이로 인해 급격한 산소의 저하와 상대적으로 이산화탄소, 황화수소, 메탄가스 등이 많이 발생되며 환기가 부족한 경우 저 산소, 고농도의 질식가스의 위험한 환경이 된다.

<Table 18> 생체의 종류별 산소 소비량 비교

생체의 종류	산소 소비량 (ml/g/day)
사람(Human)	200
원생동물(Paramecium)	500
사상균(Lusarium)	1,000
조류(Chlorella)	40,000
세균(Azotobacter)	1,200,000

또한 금속산화물 또는 저장탱크의 경우 철재보일러, 압력용기, 반응탑, 선박 등 금속산화물 또는 녹슬기 쉬운 철재, 산화반응이 쉬운 탱크의 경우 공기 중 산소와의 산화반응에 의해 기중 산소 소모량을 증가시켜 상대적으로 낮은 산소의 환경조건을 가지게 되며, 또한 탱크 내 유기물의 휘발 등으로 독성이나 질식사성 가스의 함량이 높아지는 조건을 가지게 된다.

실험동물을 이용한 각종 산소결핍 연구 자료를 보면 Toshifumi(1998)는 시험물질을 Table 19와 같이 조성하여 노출한 결과 프레온-22에 의한 질식사험에서는 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, 가스농도를 80% 산소농도를 20%로 혼합한 경우 심장 정지에 의한 사망에 이르렀다고 보고하였다(Toshifumi, 1998).

<Table 19> 시험물질별 조성과 농도

Material	Rapid asphyxia	Prolonged asphyxia	Mixed(8:2)
freon-22	2	25	92
propane	2	20-25	80-85
N ₂ O	2	18-22	75-85
methane	2	20-25	80-85

※ freon-22:O₂ (30:20 %)이고 나머지는 80:20 %로 혼합

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(Ikeda, 1990)하였으며, 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 보고(Suzuki, 1996)하였다.

또한 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 보고했으며 (Rassler 2007), OSHA 및 NIOSH에서는 사람에게 있어 산소 농도에 따른 생체 영향을 Table 20과 같이 나타내고 있다(OSHA & NIOSH, 2006).

<Table 20> 산소농도에 따른 생체 영향(OSHA & NIOSH, 2006)

산소농도 (%)	생리학적 효과
>23.5	폭발성 기체, 과 산소 효과
19.5 - 23.5	정상 호흡, 부작용 없음
15 - 19.5	피로, 피곤, 작업 능력 감소, 지구력 소실
12 - 15	맥박과 호흡 율 증가, 협동 운동 장애, 행동의부조화, 판단력 약화
10 - 12	맥박이 빨라지며 직무수행 불가, 판단력 저하, 협동 운동 소실, 입술이 파랗게 변함
8 - 10	정신력 쇠약, 실신, 구토, 의식소실, 창백해진 얼굴
6 - 8	8분 노출의 경우 50-100%, 6분 노출의 경우 25-50% 사망할 수 있으며 4-5분 노출의 경우 치료 후 회복 가능
4 - 6	40초 내로 혼수상태, 행동 조절 불가, 경련, 혼수 호흡정지, 사망

또한 질식성 가스로 하여 이산화탄소, 일산화탄소, 황화수소, 질소, 메탄가스등을 들 수 있으며 호흡하는 공기 중 농도에 따라 이산화탄소, 일산화탄소, 황화수소 생체영향을 Table 21-23에 나타내었다.

<Table 21> 이산화탄소의 농도에 따른 생리적 효과

이산화탄소(CO ₂)	생리학적 효과
0.5 - 3 %	TWA는 0.5%, STEL 3 %
2 -3 %	일부 독성작용
3 -10 %	호흡곤란, 두통, 메스꺼움이 일어나고 구토현상
10 -25 %	시력장애와 혈압상승, 마비 및 의식소실
25 % 이상	중추신경계 억제, 마비, 질식사,

<Table 22> 황화수소(H₂S)농도에 따른 생리적 효과

농도 (ppm)	생리적 효과	농도 (ppm)	생리적 효과
0.008 - 0.03	냄새 감지(Threshold)	150	후각신경 마비
10	뚜렷하게 불쾌한 냄새 (TWA 10 ppm, STEL 15 ppm)	250	장시간 노출되면 폐부종 유발
25-30	강한 냄새, 그러나 견딜 수 있을 정도임	500	1시간이내에 흥분, 두통, 현기증, 의식상실, 호흡부전 등 전신 증상 나타남
50	결막에 자극 증상을 느낌	700	곧 의식장애가 나타나고 응급구조 조치가 없으면 사망에 이름
100	3-15분 내에 후각 소실 눈과 목에 찌르는 듯한 증상	1,000 - 2,000	호흡중추가 마비되어 호흡정지로 사망하게 됨

<Table 23> 일산화탄소에 의한 농도별 생리적 효과

일산화탄소(CO)	생리학적 효과
9 ppm	주거지역 노출 기준농도
30 ppm	작업환경 (8시간) 노출기준 농도(TWA)
200 ppm	2~3시간 후의 경미한 두통, 피로, 권태감, 현기증, 메스꺼움, 단시간노출기준(STEL)
400 ppm	1~2시간 내 두통, 3시간 후 생명이 위험,
800 ppm	45분내 현기증, 메스꺼움, 경련, 2시간 내 의식 잃음 (2~3시간 내 사망)
1,600 ppm	20분내 두통, 현기증, 메스꺼움 (1시간 내 사망)
3,200 ppm	5~10분내 두통, 현기증, 메스꺼움 (30분내 사망)
6,400 ppm	1~2분내 두통, 현기증, 메스꺼움 (10~15분내 사망)
12,800 ppm	1~3분내 사망

본 연구 결과 산소결핍에서의 치사율을 보면 특히 온도에 민감한 영향을 나타내었다. 이는 온도가 상승할 경우 급격한 신진대사의 활성화로 질식의 영향이 가중되는 현상으로 Jacopo(1998)의 연구에서도 저산소증 영향은 질식에 대한 생체 반응은 동일한 산소농도에서 이산화탄소의 영향 보다 온도에 의한 영향이 더욱 큰 것으로 밝혀졌으며, 산소의 농도가 낮은 질식 상태에서 이산화탄소의 농도는 큰 영향을 주지 않지만 기온이 낮으면 반응의 효과가 억제되었으나 온도가 상승할 경우 폐활량의 증가를 통한 신진대사의 활성화 및 질식의 영향이 가중되었다고 보고(Jacopo P, 1998)하였다. 또한 Cabanac & White는 7명의 지원자를 대상으로 한 실험에서 20분 동안 정상체온보다 1.5℃ 올렸을 때 호흡변

화율, 폐환기량의 증가를 보였다고 보고하였으며(Cabanac & White, 1995), Henry & Bainton은 심부온도가 1°C 이상 상승하면 폐환기량이 증가하지만 심부온도가 1°C미만으로 상승하면 폐환기량의 증가는 없다고 하였다(Henry & Bainton, 1974).

Iwase 등은 22마리의 mouse를 대상으로 정상 산소농도 상태와 산소결핍 상태(7% O₂)로 두 군을 나누고 각 군에서 정상 체온(37°C)과 체온(39°C)이 올라간 상태를 비교하면서 8-10주간 실험한 결과 정상 산소농도에서 체온이 올라가면 폐환기량은 감소하지만 동맥혈 이산화탄소 분압(Paco 2)은 정상 범위에 있었으며, 저산소증에서는 정상체온일 때와 체온이 올라간 상태 모두 동맥혈 이산화탄소 분압(Paco 2)은 감소하였음을 보고(Iwase, 2004) 하였다.

본 연구에서도 6%의 산소결핍 환경에서 온도를 20, 30, 40°C로 상승 시킨 결과 Table 10과 같이 실험동물의 치사율이 상승하는 결과를 보여 산소결핍상황에서 환경온도의 상승은 치사율에 밀접한 관계를 갖는 것으로 평가되었다. 즉, 이는 산소 결핍 상태에서 온도를 증가시키면 동맥혈 이산화탄소의 분압(Paco 2)이 더 많이 감소하게 되고 이때 화학 감수기는 동맥혈 이산화탄소 분압(Paco 2)의 감소를 호흡중추에 전달하고 호흡중추는 보상기전으로 환기량을 줄이게 되어 정상 온도에서 필요한 산소보다 적은 산소농도를 공급받게 되어 치사율은 더 높아지게 되는 것으로 판단된다.

이와 다르게 이산화탄소의 경우 본 연구에서는 6%의 산소결핍 환경에서 이산화탄소를 2, 4, 8% 노출한 결과 역으로 이산화탄소를 노출하지 않은 산소결핍(6%) 환경에서보다 치사율이 저하되는 특이한 결과를 보였다. 호흡의 조절은 뇌의 한부분인 뇌간(brain stem)에 존재하는 호흡중추(respiratory center)에 의해 이루어지며, 혈액의 가스 분압에 의해 반응하는 화학감수기(chemoreceptor)와 기계적 자극에 예민하게 반응하는 기계자극감수기(mechanoreceptor)가 있어 호흡은 화학감수기에서 호흡중추에 정보를 보내는 반사기전에 의해 조절된다. 따라서 공기 중 이산화탄소 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 하였다.(김우겸, 1988). 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(Hill & Flack, 1998). Robertshaw 등(1998)은 mice를 대상으로 한 실험에서 마취를 한 군과 그렇지 않은 군 모두 3% 이산화탄소 농도를 투여한 군보다 5% 이산화탄소를 투여 한 군에서 호흡수의 증가를 보였음이 보고(Robertshaw, 1998) 되었으며, 이를 종합하면 이산화탄소의 농도 증가(35%이하)는 동맥혈 이산화탄소의 분압(Paco 2)을 증가시켜 호흡 중추에 전달하고 호흡 중추는 이의 보상기전으로 호흡 환기 량을 늘여 생체에 필요한 산소를 공급하게 함으로서 저산소하에서도 생존이 가능한 역할을 한 것으로 판단되었다.

그리고 이의 관련연구로 각 연구자들이 사용한 실험동물들을 보면 Rassler(2007)와 Toshifumi(1998), Morita(1998) 등은 SD rat를 사용하였으며, Blackstone(2007)과 Robertshaw 등(1998)은 mouse, Hill & Flack (1998)는 개와 고양이를 사용하여 치사농도 시험에서는 rat 또는 mouse등을 많이 사용하는 것으로 파악되었으며 실험결과를 보면 치사농도에 있어 종간에 큰 차이는 없는 것으로 사료되었다.

본 연구를 통해 조사된 국내외 제도 및 사고 사례분석을 통해 동종재해 예방을 위한 제도개선 및 기술자료 제공하고 산소를 포함 각 유해환경에서의 사망농도 및 영향규명과 각종 환경의 위험농도 예측하며, 사고 발생시 원인 규명 근거 자료로 활용과 연구자료 제공을 통해 각 환경에

서의 위험성과 생체에 미치는 심각성을 알리고 산소결핍 또는 유해가스의 치사농도의 교육자료 활용하며 산소결핍 또는 유해가스 사망농도 자료 제공하고자 하였다.

V. 결 론

밀폐공간에서의 산소결핍 또는 질식사고 등 중대사고 다발에 대한 예방대책의 일환으로 국내외 사고사례 및 제도를 조사 분석하고, 재해 발생의 원인규명과 실험동물(SD rat)을 이용 산소결핍의 치사농도와 산소결핍 상황에서 온도, 습도, 유기가스(톨루엔), 이산화탄소, 황화수소, 일산화탄소 등 각각의 환경 변화에 따른 실험동물에 미치는 영향실험을 통하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 국내외적으로 동종 재해는 6-8월에 전체의 50% 발생하며 업종은 건설업에서 40%, 장소는 맨홀 50%, 원인은 산소결핍이 가장 많았으며(40%), 기타 가스(H_2S , CO, 질소, 아르곤 등) 및 환경적 요인(내부 온도, 바닥 물 익사, 구토 물에 의한 기도 막힘)도 크게 작용하는 것으로 나타났으며, 특히 사망자 중 산소결핍 재해예방 교육 이수자 매우 미흡(3%수준)한 실정으로 나타나 교육대상 및 시기, 범위 등에 대한 고려가 필요하였다.
2. 사고원인은 작업 공간 내 환기 부족으로 산소결핍 또는 유독가스 급성중독이었으며, 안전작업 교육 미흡으로 대처능력 부족과 밀폐 공간 내 환경측정 없음으로 산소농도 또는 유해가스의 상황인식 이 불가하였으며 특히 산소결핍 상황이나 N_2 , CO_2 , 아르곤, 메탄가스 등은 무색, 무취, 무감각에 따른 심각한 위험성 감지 불가하였으며, 비상시 응급조치 및 대응방법의 미흡에 대한 개선이 필요하였다.
3. 산소결핍 규제는 한국과 일본은 “산소 18 %이하”, 미국 “19.5 %이하”, 캐나

다 “18.5 %이하”, 영국과 호주의 경우 “산소 부족으로 야기될 수 있는 환경” 또는 “밀폐 또는 위험장소” 로 규정하고 있어, 우리나라의 경우도 사고다발의 동종재해 예방을 위해 규제기준의 강화를 통한 산소결핍 장소의 경각심 고취와 산소결핍 위험작업 및 교육 대상 범위의 확대를 고려할 필요가 있을 것으로 사료된다.

4. SD rat를 이용한 치사농도 규명시험 결과 산소결핍의 치사농도는 5 %수준이었으며 양-반응(Dose-Response)관계에 의한 산소의 과반수 치사농도 LC50(rat, 4hr)는 5.5 %로 산출되었으며, 산소결핍(6%) 상황에서 온도, 습도, 톨루엔, CO₂, H₂S, CO 등 환경조건 변화실험에서 H₂S, CO 등 유해가스의 농도와 온도의 상승에 따른 치사 또는 생체의 민감도가 가장 높았고, 산소결핍(산소 6%) 상황에서 치사농도는 톨루엔의 경우 1,000 ppm에서 20% 치사, H₂S의 경우 350 ppm에서 30%치사, CO는 600 ppm는 20%치사, 그러나 CO₂의 경우 8%에서도 사망예가 없었다.

VI. 참고 문헌

- 김우겸. 호흡생리학. 도서출판 생명의 이치. p125-127
- 노동부(2007), 사망재해 예방대책 추진계획. 노동부.
- 한국산업안전공단 산업안전보건연구원(2006), 산업재해분석.
- 한국산업안전공단 산업안전보건연구원(2007), 재해조사보고서.
- 한국산업안전공단(2008), 안전보건, (6):6-11
- 한국산업안전공단(2008), 지방자치단체 관급공사업체의 밀폐공간작업 보건관리 실태조사.
- Asikainen TM, Chang LY, Coalson JJ, Schneider BK, Waleh NS, Ikegami M, Shannon JM, Winter VT, Grubb P, Clyman RI, Yoder BA, Crapo JD, White CW (2006) Improved lung growth and function through hypoxia-inducible factor in primate chronic lung disease of prematurity. *FASEB J* 10: 1698-1700
- Australian Safety News; Mar. 1998, Vol.69, No.2, pp.48-60
- Beate Ressler, Grit Marx, Christian Reissig, Marc A. Rohling, Andrea Tannapfel, Roland H. Wenger, Heinz-Gerd Zimmer (2007). Time course of hypoxia-induced lung injury in rats, *Respiratory Physiology & Neurobiology* 159, pp. 45-54
- Buddha Basnyat, David R Murdoch, High-altitude illness (2003). THE LANCET, Vol 361, June 7, www.thelancet.com
- Cabanac M, White MD.(1995). Core temperature thresholds for hyperpnea during passive hyperthermia in humans. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol.* 71(1), pp. 71-6.
- C.L. Winek, W.W. Wahba, L. Rozin(1995). Accidental death by nitrous oxide inhalation, *Forensic Sci. Int.* 73(2), pp. 139-141.

- C.M. Macfarlane(2000). Sublethal oxygen deficiency—the primary cause of cancer, *Medical hypotheses* 54(2), pp. 323–325.
- C.S. Edward and T. Dorothy (1921). A study of low oxygen effects during rebreathing. *Am. J. Physiol.*, 55, pp. 223–257.
- Chavez JC, Pichiule P, Boero J, and Arregui A.(1995). Reduced mitochondrial respiration in mouse cerebral cortex during chronic hypoxia. *Neurosci Lett* 193, pp.169–172.
- Easley RB, Fuld MK, Fernandez–Bustamante A, Hoffman EA, Simon BA (2006). Mechanism of hypoxemia in acute lung injury evaluated by multidetector–row CT. *Acad Radiol* 7, pp. 916–921.
- Edward C.S. and Dorothy T.(1921). A study of low oxygen effects during rebreathing. *Am. J. Physiol.* (55), pp. 223–257.
- Eric Blackstone and Mark B. Roth.(2007). Suspended animation–like state protects mice from lethal hypoxia. *SHOCK*. 27(4), pp. 370–372.
- Faridy EE, Sanii MR, and Thliversis JA.(1998). Fetal lung growth: influence of maternal hypoxia and hyperoxia in rats. *Respir Physiol* 73, pp. 225–241.
- Gautier, H., Bonora, M.(1992). Ventilatory and metabolic response to cold and hypoxia in intact and carotid body–denervated rats. *J. Appl. Physio* 73, pp. 847–854.
- Groenman FA, Rutter M, Wang J, Caniggia I, Tibboel D, Post M.(2007). Role of oxygen and vascular development in epithelial branching morphogenesis of the developing mouse lung. *Am J physiol Lung development. Am J Physiol Lung Cell Mol Physiol* 3, pp. L557–L567.
- Guus G Schoonman, Peter S Sandor, Arto C Nirkko, Thomas Lange(2008). Hypoxia–induced acute mountain sickness is associated with intracellular cerebral edema: a 3T magnetic resonance imaging study, *Journal of Cerebral Blood Flow & Metabolism* 28, pp. 198–206.
- <http://www.mhlw.go.jp>.

- http://www.osha.gov/SLTC/etools/oilandgas/general_safety/h2s_monitoring.html
- Henry JG, Bainton CR.(1974). Human core temperature increase as a stimulus to breathing during moderate exercise. *Respir Physiol.* 21(2), pp. 183-91.
- Hill L, Flack M.(1998). The effect of excess of carbon dioxide and of want of oxygen upon the respiration and the circulation. *J Physiol.* 30:37(2), pp. 77-111.
- Ikeda N, Takahashi H, Umetsu K, Suzuki T.(1990). The course of respiration and circulation in 'toluene-sniffing'. *Forensic Sci Int.* 44(2-3), pp. 151-158.
- Iwase M, Izumizaki M, Kanamaru M, Homma I.(2004). Effects of hyperthermia on ventilation and metabolism during hypoxia in conscious mice. *Jpn J Physiol.* 54(1), pp. 53-59.
- Jacopo P. Mortola., Michael Maskrey(1998). Ventilatory response to asphyxia in conscious rats: effect of ambient and body temperatures. *Respiration Physiology 111*, pp. 233-246.
- Jiang BH, Semenza GL, Bauer C, and Marti HH.(1996). Hypoxia-inducible factor 1 levels vary exponentially over a physiologically relevant range of O₂ tension. *Am J Physiol Cell Physiol* 274, pp. C1172-C1180.
- Judith A. Neubauer, Physiological and Genomic Consequences of Intermittent Hypoxia(2001). *Invited Review: Physiological and pathophysiological responses to intermittent hypoxia*, *J Appl Physiol* 90, pp. 1593-1599.
- Kitaev MI, Airbaev KA, and Liamtsev VT.(1999). Effect of hypoxic hypoxia on development of atherosclerosis in rabbits. *Aviakosm Ekolog Med* 33, pp. 54-57.
- Li D, Zhou N, and Johns RA(1999). Soluble guanylate cyclase gene expression and localization in rat lung after exposure to hypoxia. *Am J*

- Pjysiol Lung Cell Col Physiol* 277, pp. L841-L847.
- M. Yamazaki, M.N. Islam, Y. Ogura, K.Honda, H. Tsuchihashi, H. Nishioka(1997). An autopsy case of carbon dioxide intoxication, *Nippon Hoigaku Zasshi* 51(6), pp. 446-451.
- Maiti P, Singh SB, Muthuraju S, Veleri S, Ilavazhagan G.(2007). Hypobaric hypoxia damages the hippocampal pyramidal neurons in the rat brain. *Brain Res. Oct 17, 1175*, pp. 1-9.
- Morita Masahiko, Toshifumi WstanabeJacopo.(1998). *Forensic Science International* 96, pp. 45-59.
- N. Ikeda, D. Mei, H. Takahashi and T. Suzuki(1989). The course of respiration and circulation in death due to oxygen deficiency. *Res. Pract. Forensic Med.*, 32, pp. 135-139.
- NIOSH(1987). A Guide To Safety in Confined Space. National Institute for Occupational Safety and Health(NIOSH).
- NIOSH(1979). Criteria for a Recommended Standard: Working in Confined Spaces. National Institute for Occupational Safety and Health(NIOSH).
- R. J. Julian(2007). The Response of the Heart and Pulmonary Arteries to Hypoxia, Pressure, and Volume. A Short Review, *Poultry Science* 86, pp. 1006-1011.
- Rassler B, Marx G, Reissig C, Rohling MA, Tannapfel A, Wenger RH, Zimmer HG.(2007). Time course of hypoxia-induced lung injury in rats. *Respir Physiol Neurobiol.* Oct 15;159(1), pp. 45-54.
- Robertshaw D.(2006). Mechanisms for the control of respiratory evaporative heat loss in panting animals. *J Appl Physiol.* 101(2), pp. 664-668.
- Rodway GW, Hoffman LA, Sanders MH (2003). High-altitude-related disorders, part I: Pathophysiology, differential diagnosis, and treatment. *Heart Lung* 32, pp. 353-359.
- Rubin M. Tuder, Jeong H. Yun, Anil Bhunia, Iwona Fijalkowska(2007).

- Hypoxia and chronic lung disease, *J Mol Med* 85, pp. 1317-1324.
- Saiki, C., Matsuoka, T., Mortola, J.P.(1994). Metabolic-ventilatory interaction in conscious rats: effect of hypoxia and ambient temperature. *J. Appl. Physiol.* 76, pp. 1594-1599.
- Schoonman GG, Sándor PS, Nirikko AC, Lange T, Jaermann T, Dydak U, Kremer C, Ferrari MD, Boesiger P, Baumgartner RW.(2008). Hypoxia-induced acute mountain sickness is associated with intracellular cerebral edema: a 3 T magnetic resonance imaging study. *J Cereb Blood Flow Metab. Jan;28(1)*, pp. 198-206.
- Semenza GL.(2005). Involvement of hypoxia-inducible factor 1 in pulmonary pathophysiology. *Chest*, 128: Suppl. 6, pp. 592S-594S.
- Srikumar BN, Raju TR, Shankaranarayana Rao BS. (2006). The involvement of cholinergic and noradrenergic systems in behavioral recovery following oxotremorine treatment to chronically stressed rats. *Neuroscience* 143, pp. 679-688.
- Suruda A, Agnew J.(1989). Deaths from asphyxiation and poisoning at work in the United States 1984-6. *British Journal of Industrial Medicine* 46, pp. 541-546.
- Toshifumi Watanabe, Masahiko Morita.(1998). Asphyxia due to oxygen deficiency by gaseous substances. *Forensic Science International.* 96, pp. 47 - 59.
- Tsuneo Suzuki.(1996). Suffocation and related problems. *Forensic Science International* (80), pp. 71-78.
- U.S.(2006). Bureau of Labor Statistics, Census of Fatal Occupational Injuries (CFOI) - Current and Revised Data.
- V.D. Khoklov(1996). A case of fatal carbon dioxide gas poisoning, *Sue. Med. Ekspert.* 39(2), pp. 47-48.
- Van Tuyl M, Liu J, Wang J, Kuliszewski M, Tibboel D, Post M (2005).

Role of oxygen and vascular development in epithelial branching morphogenesis of the developing mouse lung. *Am J Physiol Lung Cell Mol Physiol* 1, pp. L167-L178.

Weissmann N, Sommer N, Schermuly RT, Ghofrani HA, Seeger W, Grimminger F (2006). Oxygen sensors in hypoxic pulmonary vasoconstriction. *Cardiovasc Res* 4, pp. 620-629.

(Abstracts)**A Study on the Effects of Working Environment (Oxygen Concentration, Harmful Gas, etc.) on Physiology and Motility**

HY Kim, SB Lee, JH Han, MG Kang, BJ Ye

As an effort to prevent serious accidents such as oxygen deficiency and suffocation in closed spaces and to identify the causes of such accidents, the present study investigated accidents and systems in Korea and other countries, and conducted experiments on the lethal concentration of oxygen deficiency and how experimental animals are affected by temperature, humidity, organic gas (toluene), carbon dioxide, hydrogen sulfide, carbon monoxide, etc. in an oxygen deficient situation. The results of this study are as follows.

1. In Korea and other countries, around 50% of disasters took place in June October according to season, 40% at construction sites according to business category, 50% at manholes according to place, and 40% by oxygen deficiency according to cause. Other gases (H₂S, CO, nitrogen, argon, etc.) and environmental factors (inside temperature, drowning in floor water, and respiratory obstruction by vomitus) were also critical factors. Particularly

among the dead, only 3% had had education on the prevention of oxygen deficiency disasters, and this suggests the necessity of considering the subjects, time and scope of education.

2. The causes of accidents were oxygen deficiency or acute intoxication with toxic gas resulting from inadequate ventilation inside the working space. In addition, the victims lacked abilities to cope with such accidents due to insufficient education on work safety, and it was impossible to recognize oxygen concentration or the state of harmful gases because the environment of closed spaces was not monitored. In particular, oxygen deficiency and harmful gases such as N₂, CO₂, argon and methane gas were hard to detect their serious danger because of their colorless, odorless and insensible properties. Thus, it is necessary to improve emergency measures and coping methods.
3. Oxygen deficiency is defined as “oxygen concentration below 18%” in Korea and Japan, “below 19.5 %” in the U.S., “below 18.5%” in Canada, and “environment that may cause oxygen deficiency” or “closed or dangerous places” in the U.K. and Australia. By tightening regulations for preventing frequent types of disasters, we need to enhance people’s awareness of oxygen deficient spaces and to expand the subjects and scope of education on oxygen deficiency risks.
4. In the results of an experiment on lethal concentration using rats,

the lethal concentration of oxygen deficiency was 5 %, and the majority lethal oxygen concentration LC₅₀ based on dose response relation was 5.5%. In the experiment that varied environmental conditions such as temperature, humidity, toluene, CO₂, H₂S, and CO in oxygen deficiency (6%), death rate or physiological sensitivity increased most by the increase in the concentration of harmful gases such as H₂S and CO and the rise of temperature. In oxygen deficiency (6%), the lethal concentration was 20% at 1,000 ppm for toluene, 30% at 350 ppm for H₂S, and 20% at 600 ppm for CO. However, there was no death caused by CO₂ even when the concentration was 8%.

VII. Appendixes

(동물실험 윤리위 회의 자료)

동물실험계획서

Institutional Animal Care and Use Committee
Occupational Safety and Health Research Institute

일련번호 : IA08-0019

접수일자 : 2008. 04. 18.

시험번호	자체시험				
연구과제명	산소농도와 유해가스 및 작업환경이 생체 및 운동성에 미치는 영향 연구				
연구책임자	성명 (한글)	성명 (영문)	소속	직위	연락처
	김현영	Hyeon-Yeong Kim	독성연구팀	팀장	042-869-0341
	E-mail : kk3843@yahoo.co.kr				
연구비	내부, 3,000만원				
연구과제	신규				

윤리적 동물실험방법의 준수

본 연구수행을 위하여

1. 실험동물의 윤리적 사용과 3R원칙에 따라 동물실험의 수행에 대하여 충분히 검토하였습니다.
2. 동물보호법, 동물실험관련 SOP 및 산업안전보건연구원 화학물질안전보건센터 동물실험윤리위원회에서 검토 후 승인한 동물실험 방법을 준수하겠습니다.
3. 과제책임자로서 등록된 실험수행자들이 실험동물의 윤리적 사용과 승인된 동물실험 방법을 준수하도록 책임·지도하겠습니다.
4. 위 사항의 이행과 함께 위원회 및 동물실험시설 운영자의 결정에 적극 협조하고 따를 것을 서약하며 본 동물실험계획서를 제출합니다.

연구책임자	김현영	2008년 04월 18일
동물실험실 책임자	김종규	2008년 04월 18일
실험동물관리위원장	양정선	2008년 04월 18일

1. 동물실험참여자					
성명(한글)	성명(영문)	직급	소속	연락처/E-mail	서명
김현영	HY Kim	연구위원	독성연구팀	042-869-0341	
이성배	SB Lee	연구원	독성연구팀	042-869-0341	
한정희	JH Han	연구원	독성연구팀	042-869-0341	
강민구	MG Kang	연구원	독성연구팀	042-869-0341	
※ 실험자를 위한 작업환경의 안전성 확보 여부 청정동물실험실 확보					

※ 동물실험을 수행할 모든 시험자 및 시험보조자를 기입하기 바라며, 위 사항을 준수할 것을 다짐한다면 서명하시기 바랍니다.

2. 동물실험 대체법과 불필요한 동물실험의 금지

2-1 동물실험 필요근거	
살아있는 실험동물을 사용해야 하는 이유 (해당되는 사항에 <input checked="" type="checkbox"/> 표 하시오)	
<input type="checkbox"/>	실험과정상 in vitro 실험이 불가능하다.
<input type="checkbox"/>	대체수단의 이용에 관한 연구결과나 정보가 불충분하다
<input type="checkbox"/>	사람이나 실험동물에 적용하기 전에 필요한 (안전성 혹은 유효성) 시험이다.
<input checked="" type="checkbox"/>	동일한 내용의 실험결과가 없다
<input type="checkbox"/>	현재까지 알려진 최선의 실험/교육방법이다
<input type="checkbox"/>	실험동물의 행동학적 혹은 생태학적 관찰이 필요하다
<input type="checkbox"/> 기타사유	

2-2. 실험에 사용할 동물의 수를 줄이거나 동물의 고통을 줄이기 위하여 동물실험을 대체 할 연구방법 등을 검색한 조사자료 확인

OECD의 화학물질에 의한 건강장해 예방 시험법
대체 수단이 없다 (0)
대체 수단이 있으나 이 연구에 적용하기 어려운 이유 ⇒

※ 검색을 하여 동물실험 대체수단이 없는 경우에는 ○표를 해주시고 대체 수단이 있어도 연구에 적용하기 어려운 경우에는 이유를 기술하여 주십시오.

3. 동물실험의 세부내용

3-1. 실험기간	3-2. 사용 동물실	
2008년 4월 28일 ~ 2008년 10월 15일	흡입챔버실 II	
해당실험기간을 초과하여 실험이 진행될 가능성	<input checked="" type="checkbox"/> 있다	<input type="checkbox"/> 없다

3-3. 사용동물 종 (해당되는 사항에 <input checked="" type="checkbox"/> 표 하시오)
<input type="checkbox"/> Mouse <input checked="" type="checkbox"/> Rat <input type="checkbox"/> Guinea Pig <input type="checkbox"/> Rabbit <input type="checkbox"/> Hamster <input type="checkbox"/> Dog <input type="checkbox"/> Cat <input type="checkbox"/> Pig <input type="checkbox"/> Gerbil <input type="checkbox"/> 기타 :

※ 산업안전보건연구원 화학물질안전보건센터 실험에 사용되거나 동물실험시설에 반입되는 마우스, 랫트는 SPF(Specific Pathogen Free)를 원칙으로 하며, SPF증명서를 필요로 합니다.

3-4. 세부 내용							
계통명	SD Rat	동물공급처(생산자)	국내 또는 국외 SPF동물				
품질구분							
<input checked="" type="checkbox"/> SPF(Specific Pathogen Free), <input type="checkbox"/> CL(Clean), <input type="checkbox"/> CV(Conventional) <input type="checkbox"/> Germ Free, <input type="checkbox"/> 무확인							
동물규격							
체중:	350g 수준	주령	10Weeks	pregnant	days	마리수	350♂, ♀

3-5. 동물 실험형태를 선택하여 주십시오 (해당되는 모든 사항에 <input checked="" type="checkbox"/> 표 하시오)
<input type="checkbox"/> 시료의 투여 및 접종 <input type="checkbox"/> 재료 및 시료의 채취 <input type="checkbox"/> 외과적 처치 <input type="checkbox"/> 유전 및 육종 <input type="checkbox"/> 방사선 조사 <input type="checkbox"/> 감염 <input type="checkbox"/> 발암 <input type="checkbox"/> 행동관찰 <input checked="" type="checkbox"/> 기타: 흡입노출

3-6. 해당 동물종 및 계통을 선택한 합리적 이유(해당되는 사항에 <input checked="" type="checkbox"/> 표 하시오)
<input type="checkbox"/> 승인받으려는 실험을 수행하기 위하여 생물학적, 해부학적, 시험물질에 대한 감수성 등의 면에서 해당 동물종류(계통)이 필요하다 <input checked="" type="checkbox"/> 해당 동물종류(계통)은 위 연구와 관련하여 질환 혹은 연구모델로 쓰이고 있다 <input type="checkbox"/> 기존 연구과제 수행에 지속적으로 사용해 온 동물종류(계통)이다 <input type="checkbox"/> 연구과제나 실험 수행을 위한 목적 실험동물이다 <input type="checkbox"/> 기타 사유(연구와 관련된 동물종류와 계통)의 생물학적 특성 기술)

3-7. 사용 동물수에 대한 합리적 근거 사유 (가능하면, 각 실험군의 수, 통계적 처리내용 설명)
산소농도 및 다양한 환경변화에 따른 생체영향을 시험하고 시험결과의 신뢰적 통계자료 생산을 위해 실험군당 최소 5마리이상으로 하였으며 수컷을 대표로 하였다.

4. 실험방법

※ 실험동물에 행해지는 동물실험의 내용에 관하여 상세히 기술해 주십시오, 특히 실험동물을 각 군으로 나눌 경우 이에 관하여 상세히 기술하십시오. 또는 GLP시험일 경우에는 해당시험계획서를 첨부하여 아래 표 내용기입을 대체할 수도 있습니다.

4-1. 실험과정
(실험군의 분류 및 실험기간, 순화과정, 투여용량/방법/횟수, 관찰기간, 안락사 및 조직채취, 마취방법, 수술방법, 수술 후 처치)
※ 외과적 처치를 포함하지 않는 실험인 경우
※ 외과적 처치를 포함하는 실험인 경우, 수술방법
실험군은 산소농도 및 환경조건에 따른 시험군으로 분류하고 노출은 48시간이내, 순화 1주일이상, 48시간이내 연속노출, 관찰기간 48시간이내, 마취에 의한 안락사, 복부 복개 후 사망원인 분석, 수술 후 폐기물 전문업체에 위탁 처리함
수술 후 관리방법 (해당될 경우 해당 사항에 모두 <input checked="" type="checkbox"/> 표 하시오 <input type="checkbox"/> 항생제 투여, <input type="checkbox"/> 진통제 투여, <input type="checkbox"/> 수액처치, <input type="checkbox"/> 기타 (마취제 투여)
※ 복수의 대규모 수술 실험(Multile Major Operative Procedures)을 시행하는 경우 그 필요 사유 - 단, 원칙적으로 불허함

4-2. 동물의 고통 정도에 따른 동물실험계획의 분류기준(해당되는 사항에 <input checked="" type="checkbox"/> 표 하시오)	
구분	내용
<input type="checkbox"/> 등급 A	생물개체를 이용하지 아니하거나 세균, 원충 및 무척추동물을 사용한 실험, 교육, 연구, 수술 또는 시험
<input type="checkbox"/> 등급 B	실험, 교육, 연구, 수술 또는 시험을 목적으로 사육, 적응 또는 유지되는 척추동물
<input type="checkbox"/> 등급 C	척추동물을 대상으로 고통이나 억압이 없고, 고통을 줄여주는 약물을 사용하지 아니하는 실험, 교육, 연구, 수술 또는 시험
<input type="checkbox"/> 등급 D	척추동물을 대상으로 고통이나 억압을 동반하는 실험, 교육, 연구, 수술 또는 시험으로서, 적절한 마취제나 진통제 등이 사용되는 경우
<input checked="" type="checkbox"/> 등급 E	척추동물을 대상으로 고통이나 억압을 동반하는 실험, 교육, 연구, 수술 또는 시험으로서, 마취제나 진통제 등이 사용되지 아니하는 경우

5. 실험동물의 사육관리

※ 동물실 출입자 교육을 이수하지 않은 자는 동물실에 출입할 수 없습니다. 다만 운영책임자의 허가를 받은 자는 산업안전보건연구원 화학물질안전보건센터의 동물실 출입자 교육을 이수하지 않더라도

도 출입이 가능할 수 있다.

5-1. 실험동물시설 이용	
1) 동물실에 반입이 필요한 물품 또는 장비(기존 동물실에 구비된 물품 및 장비 이외) :	사료, 시험기구, 실험동물 등
2) 특정사료공급 : 동물시험용 사료	실험동물용 방사선 멸균사료(PICOLAP 5053PMI)
3) 그 외 기타 :	

* 사육시설 내에서 사육중인 마우스, 랫드는 사육시설 외부로 반출되면 사육실 내부로 재반입이 불가능합니다.

5-2. 사육시설 이외의 실험동물 이동	
1) 장소 :	(독성실험동)건물, (1)층, (흡입독성)연구실
2) 이용장비 :	케이지 및 이동랙
3) 연구내용 :	산소 및 환경 변화에 따른 생체영향 시험

* 실험동물사육시설 이외의 장소로 동물을 이동시켜 실험할 경우 장소, 이용장비 및 연구내용을 기재하여 주십시오.

5-3. 실험동물 사육시설(해당되는 사항에 <input checked="" type="checkbox"/>표 하시오)	
SPF 사육시설	<input checked="" type="checkbox"/> 동물 사육실 I <input type="checkbox"/> 동물 사육실 II <input checked="" type="checkbox"/> 흡입 챔버실 I <input type="checkbox"/> 흡입 챔버실 II
비설치류 동물사육구역	<input type="checkbox"/> 소동물 사육실

5-4. 실험기간 중 운동제한 (실험과정 중 실험동물의 운동을 강제적으로 제한한 경우)	
1) 실험기간 :	2008. 4. 28 - 2008. 10. 15
2) 방법 :	흡입노출에 의한 관찰 및 부검
3) 1회 처치 시간 :	48시간이내
4) 반복횟수 :	1회

5-5. 장기간의 사료 및 음수제한	
(실험과정 중 실험동물의 사료 및 음수 섭취를 강제적으로 제한할 경우)	
1) 실험기간 :	시험물질 노출기간
2) 방법 :	절식, 급수
3) 1회 처치 시간 :	48시간이내
4) 반복횟수 :	1회

6. 실험동물의 관리

* 실험과정 중 또는 종료시에 실험동물의 고통을 줄이기 위해서 적절한 조치를 취해야 합니다.

6-1. 마취제 사용(혹은 근이완제)			
마취제 종류	투여경로	용량	비고

※ 마취제(Anesthetics)와 근이완제(Paralytic Agent)를 병용하는 경우, 병용사유			

6-2. 진정제 사용			
약제종류	투여경로	용량	비고

6-3. 진통제 사용				
약제종류	투여경로	용량	횟수	비고

6-4. 안락사 및 사체처리 방법		
<input type="checkbox"/> 경추탈골 <input type="checkbox"/> CO ₂ <input checked="" type="checkbox"/> 마취제 사용 <input type="checkbox"/> 기타 ()		
마취제 (종류, 용량)	사체보관장소	사체처리업체명
에틸에테르	1층 사체보관냉동고	삼우그린

6-5. 동물에 극도의 통증 또는 스트레스를 가하는 결과가 예상될 경우, 적절한 중재, 인도적인 실험종료(Human endpoint) 또는 안락사를 취하기 위한 기준

7. 면역반응, 채혈 및 투여

	동물종류	경로	용량	횟수
1				
2				
3				
4				

※ 실험과정 중 채혈 및 투여가 필요한 경우에는 위의 사항을 기재하시오

	동물종류	Adjuvant 종류	투여경로	용량	횟수
1					
2					
3					
4					

※ 실험과정 중 면역반응이 필요한 경우에는 위의 사항을 기재하시오

8. 생물학적 위해 물질 실험

8-1. 실험과정 중 carcinogen, infectious agents를 실험동물에 투여할 경우
1) 투여물질 : 발암물질이나 전염물질 사용 없음
2) 용량 및 횟수:
3) 투여방법 :

8. 생물학적 위해 물질 실험

8-1. 실험과정 중 carcinogen, infectious agents를 실험동물에 투여할 경우

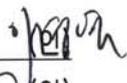
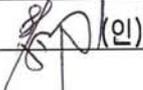
1) 투여물질 :
 2) 용량 및 횟수:
 3) 투여방법 :
 4) 처리방법 :
 5) 위해도 유무 및 정도(연구자 혹은 실험동물에게) :

사람 → 동물간 전염 가능성 () 동물 → 동물 전염 가능성 ()
 생물 위해 물질이 동물에서 배출될 가능성 () 배출 경로 ()

※ Infectious agent의 경우 미국 CDC의 Biological level을 참조하시기 바랍니다.

8-2. 실험과정 중 인체 혹은 동물에서 유해한 biological materials을 실험동물에 투여한 경우

1) Source :
 2) Species of recipient :
 3) 위해도 유무 및 정도 (연구자 혹은 실험동물에게) :

검토자 1	이 경 열		2008년	4	월	24	일
검토자 2	도 기 동	 (인)	2008년	4	월	24	일

동물실험계획 심의평가서

1. 동물실험계획 관련사항

접수번호	LA08-00019	평가차수	제 / 차
평가자	도기동	평가일	08년 4월 2일

2. 동물실험계획 심의평가

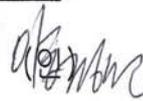
연번	평가항목	세부평가기준	심의평가 점수	평가의견
1	동물실험 필요근거	<ul style="list-style-type: none"> · 연구과제의 수행과 목적달성을 위하여 동물실험이 필수적이며 타당한가 · 동물을 사용하여 얻어지는 학문적 또는 경제적 가치가 동물을 희생하는 것보다 월등히 큰가 	+ + + + + ② ④ ⑥ ⑧ ⑩	10
2	동물실험의 대체방법 사용가능성	<ul style="list-style-type: none"> · 해당 동물실험에 대한 대체방법에 관한 정보를 검색하고 충분히 고려하였는가 · 동일한 실험물질에 대하여 실험한 정보의 중복여부를 검색하였는가 	+ + + + + ② ④ ⑥ ⑧ ⑩	8
3	동물실험 절차 및 동물관리	<ul style="list-style-type: none"> · 동물실험절차 및 실험기간이 과학적이고 적정한가 · 동물실험과 동물관리의 모든 과정에서 그 기준이 적정하고, 동물복지와 윤리적 취급이 고려되었는가 · 장기실험 등에서의 동물의 엔리치먼트를 고려하였는가 	+ + + + + ② ④ ⑥ ⑧ ⑩	10
4	동물종류 및 계통 선택사유	<ul style="list-style-type: none"> · 동물실험 수행에 있어 선택한 동물종류 및 계통의 선택이 적절한가 	+ + + + + ② ④ ⑥ ⑧ ⑩	10
5	동물수의 적정성	<ul style="list-style-type: none"> · 연구과제의 목적한 결과를 도출하기 위하여 계획한 동물의 총 수와 해당 동물실험의 내용이 일치하는가 · 실험군별 동물 수가 통계적으로 유의한가 	+ + + + + ② ④ ⑥ ⑧ ⑩	10
6	동물의 인도적 처리기준	<ul style="list-style-type: none"> · 동물실험 중 실험동물의 질병이 발생하거나 실험을 중단해야 할 경우, 그 판단기준이나 문헌이 제시되었는가 · 동물의 수의학적 처치에 관한 사항이 있는가. · 동물의 안락사 방법과 용량 등이 해당 동물종류와 계통에 적절한가 	+ + + + + ② ④ ⑥ ⑧ ⑩	8

연번	평가항목	세부평가기준	심의평가점수	평가의견
7	실험중/중료 시 동물의 고통 감소방안	<ul style="list-style-type: none"> · 동물의 고통을 수반하는 경우 그 감소를 위하여 진통·진정·마취제의 사용을 고려하였는가 · 진통·진정·마취제의 사용량, 방법 및 종류가 해당 실험에 사용하는 동물종류 및 계통에 적절한가 		10
8	실험 중 실험동물의 고통과 스트레스 정도	<ul style="list-style-type: none"> · 동물에 사료급여나 급수의 제한이 있는 경우 그 사유가 적절하며 동물의 생리적 한계를 저해하지 않는 수준인가 · 장시간 동물의 신체적 행동을 속박하는 경우 그 과학적 사유가 분명하며 결과를 도출하기 위한 최소의 시간을 배정하였는가 · 동물실험의 모든 과정에서 실험동물이 받을 고통에 대한 분류가 적절한가 		10
9	실험물질이 동물과 환경에 미치는 영향	<ul style="list-style-type: none"> · 실험동물이 실험물질로 인하여 동물실험 전후에 받을 수 있는 부작용과 역작용에 대하여 충분히 고려하였는가 · 실험물질과 실험동물의 사체나 배설물 등이 인간의 안전과 동물실험시설과 환경에 미치는 영향을 검토하고 고려하였는가 		8
10	기타	<ul style="list-style-type: none"> · 동물보호법 제13조제6항에 해당되는 실험의 경우 그 근거가 타당한가 · 동물실험을 실시하는 관계자의 교육 및 훈련정도가 적절한가 · 동물실험 중 외과적 처치 등 전문기술이 필요한 경우, 실시자가 전문적이며 훈련의 숙련도가 적절한가 		10
평가 총점(100)			점	94

* 평가기준은 평가항목별로 매우 적합하다(10), 적합하다(8), 보통이다(6), 부적절하다(4), 매우 부적절하다(2)의 5단계로 나누어 평가한다(심의평가점수 란에 평가점수 기록 또는 해당 숫자에 ○ 표시)

3. 종합 심의평가의견

종합 심의평가 결과		종합 평가의견 및 수정 보완해야할 사항
원안승인	○	
수정후 승인		
수정후 재심		
불승인		

위원장 : 양정선 

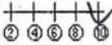
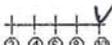
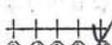
※ 종합 심의평가 결과는 ①평가항목당 평가점수가 6점이상 평가총점이 80점 이상인 경우 원안승인, ②평가항목당 평가점수가 6점이상이며 평가총점이 60점이상 80점 미만인 경우로서 1개이상의 평가항목에 대한 동물실험계획서를 간단한 수정으로 보완될 수 있는 경우 수정 후 승인, ③평가총점이 60점이상 80점 미만이나 평가점수가 4점이하인 평가항목이 1개이상 있는 경우 그 평가항목에 대한 동물실험계획서를 수정 보완이 가능한 경우 수정 후 재심의, ④평가총점이 60점 미만이거나 평가총점이 60점이상 80점 미만으로서 평가점수가 4점이하인 평가항목이 1개이상 있고 그 평가항목에 대한 동물실험계획서를 수정 보완이 어려운 경우 불승인으로 각각 평가한다(해당 란에 ○ 표시)

동물실험계획 심의평가서

1. 동물실험계획 관련사항

접수번호	1A08-0019	평가차수	제 1 차
평가자	이 경명	평가일	2008년 4월 24일

2. 동물실험계획 심의평가

연번	평가항목	세부평가기준	심의평가점수	평가의견
1	동물실험 필요근거	<ul style="list-style-type: none"> · 연구과제의 수행과 목적달성을 위하여 동물실험이 필수적이며 타당한가 · 동물을 사용하여 얻어지는 학문적 또는 경제적 가치가 동물을 희생하는 것보다 월등히 큰가 		10
2	동물실험의 대체방법 사용가능성	<ul style="list-style-type: none"> · 해당 동물실험에 대한 대체방법에 관한 정보를 검색하고 충분히 고려하였는가 · 동일한 실험물질에 대하여 실험한 정보의 중복여부를 검색하였는가 		10
3	동물실험 절차 및 동물관리	<ul style="list-style-type: none"> · 동물실험절차 및 실험기간이 과학적이고 적정한가 · 동물실험과 동물관리의 모든 과정에서 그 기준이 적정하고, 동물복지와 윤리적 취급이 고려되었는가 · 장기실험 등에서의 동물의 엔리치먼트를 고려하였는가 		9
4	동물종류 및 계통 선택사유	<ul style="list-style-type: none"> · 동물실험 수행에 있어 선택한 동물종류 및 계통의 선택이 적절한가 		10
5	동물수의 적정성	<ul style="list-style-type: none"> · 연구과제의 목적한 결과를 도출하기 위하여 계획한 동물의 총 수와 해당 동물실험의 내용이 일치하는가 · 실험군별 동물 수가 통계적으로 유의한가 		10
6	동물의 인도적 처리기준	<ul style="list-style-type: none"> · 동물실험 중 실험동물의 질병이 발생하거나 실험을 중단해야 할 경우, 그 판단기준이나 윤선이 제시되었는가 · 동물의 수의학적 처치에 관한 사항이 있는가 · 동물의 안락사 방법과 용량 등이 해당 동물종류와 계통에 적정한가 		10

연번	평가항목	세부평가기준	심의평가 점수	평가의견
7	실험중/종료 시 동물의 고통 감소방안	· 동물의 고통을 수반하는 경우 그 감소를 위하여 진통·진정·마취제의 사용을 고려하였는가 · 진통·진정·마취제의 사용량, 방법 및 종류가 해당 실험에 사용하는 동물종류 및 계통에 적절한가		.10
8	실험 중 실험동물의 고통과 스트레스 정도	· 동물에 사료급여나 급수의 제한이 있는 경우 그 사유가 적절하며 동물의 생리적 한계를 저해하지 않는 수준인가 · 장시간 동물의 신체적 행동을 속박하는 경우 그 과학적 사유가 분명하며 결과를 도출하기 위한 최소의 시간을 배정하였는가 · 동물실험의 모든 과정에서 실험동물이 받을 고통에 대한 분류가 적절한가		10
9	실험물질이 동물과 환경에 미치는 영향	· 실험동물이 실험물질로 인하여 동물실험 전후에 받을 수 있는 부작용과 역작용에 대하여 충분히 고려하였는가 · 실험물질과 실험동물의 사체나 배설물 등이 인간의 안전과 동물실험시설과 환경에 미치는 영향을 검토하고 고려하였는가		9
10	기타	· 동물보호법 제13조제6항에 해당되는 실험의 경우 그 근거가 타당한가 · 동물실험을 실시하는 관계자의 교육 및 훈련정도가 적절한가 · 동물실험 중 외과적 처치 등 전문기술이 필요한 경우, 실시자가 전문적이며 훈련의 숙련도가 적절한가		10
평가 총점(100)			98 점	

* 평가기준은 평가항목별로 매우 적합하다(10), 적합하다(8), 보통이다(6), 부적절하다(4), 매우 부적절하다(2)의 5단계로 나누어 평가한다(심의평가점수 란에 평가점수 기록 또는 해당 숫자에 O 표시)

3. 종합 심의평가의견

종합 심의평가 결과		종합 평가의견 및 수정 보완해야할 사항
원안승인	○	
수정후 승인		
수정후 재심		
불승인		

위원장 : 양정선 (인)

※ 종합 심의평가 결과는 ①평가항목당 평가점수가 6점이상 평가총점이 80점 이상인 경우 원안승인, ②평가항목당 평가점수가 6점이상이며 평가총점이 60점이상 80점 미만인 경우로서 1개이상의 평가항목에 대한 동물실험계획서를 간단한 수정으로 보완될 수 있는 경우 수정 후 승인, ③평가총점이 60점이상 80점 미만이나 평가점수가 4점이하인 평가항목이 1개이상 있는 경우 그 평가항목에 대한 동물실험계획서를 수정 보완이 가능한 경우 수정 후 재심의, ④평가총점이 60점 미만이거나 평가총점이 60점이상 80점 미만으로서 평가점수가 4점이하인 평가항목이 1개이상 있고 그 평가항목에 대한 동물실험계획서를 수정 보완이 어려운 경우 불승인으로 각각 평가한다(해당 란에 ○ 표시)

실험동물시설 이용 등록 신청서

접수번호	IA08-0019	의뢰일자	2008년 04월 18일	
신청자	성명	소속	직위	연락처
	강민구	독성연구팀	연구원	내선)042-869-0355 호출)011-453-9920
연구책임자	김현영	독성연구팀	팀장	내선)042-869-0341 호출)
연구과제명	산소농도와 유해가스 및 작업환경이 생체 및 운동성에 미치는 영향 연구			
시험(실습) 목적	산소결핍에 의한 사망 및 건강장해 예방연구			

1. 나는 산업안전보건연구원 화학물질안전보건센터 실험동물윤리위원회 (Institutional Animal Care and Use Committee) 방침 및 동물실험 관련 법규를 따를 것을 약속합니다.

2. 본인은 실험동물의 이용수칙을 철저히 준수하겠습니다.

3. 위의 사항을 위반하였을 경우 실험동물시설의 사용 제한 등의 불이익을 감수하겠습니다.

시험책임자 김현영 (인)
 신청자 강민구 (인)

실험동물윤리위원회 심의		
실험동물시설이용허가	2008년 4월 18일	교육이수유무
		(유 무)

<<연 구 진>>

연 구 기 관 : 한국산업안전보건공단 산업안전보건연구원

연구책임자 : 김 현 영 (연구위원, 화학물질안전보건센터)

연 구 원 : 이 성 배 (연 구 원, 화학물질안전보건센터)

한 정 희 (연 구 원, 화학물질안전보건센터)

강 민 구 (연 구 원, 화학물질안전보건센터)

예 병 진 (연 구 원, 동아대학교 산업의학과)

<<연 구 기 간>>

2008. 1. 1 ~ 2008. 12. 31

본 연구보고서에 기재된 내용은 연구책임자의 개인적 견해이며, 우리 연구원의 공식견해와 다를 수도 있음을 알려드립니다.

한국산업안전보건연구원 원장

산소농도와 유해가스 및 작업환경이 생체 및 운동성에 미치는 영향 연구

(보건분야 - 연구자료 연구원 2008-128-1455)

발 행 일 : 2008년 12월 31일
발 행 인 : 산업안전보건연구원 원 장 박 두 용
연구책임자 : 화학물질안전보건센터 연구위원 김 현 영
발 행 처 : **한국산업안전보건공단 산업안전보건연구원**
주 소 : 대전시 유성구 문지동 104-8
전 화 : (042) 869 - 0341
F A X : (042) 863 - 9001
Homepage : <http://oshri.kosha.or.kr>

[비매품]