

저산소농도의 화재시 영향

1. 서 언

본 논문은 대기 중의 산소량을 인명을 위협하지 않는 수준으로 통제하여 화재를 현격히 감소 또는 제거할 수 있음을 제시하려는 것으로, 인명에 대단히 적대적이고 탈출이 거의 불가능한 환경, 즉 우주, 해양, 해저 등에서 활동하는 유인 캡슐의 화재위험을 줄이려는 의도에서 시작된 것이다. 화재 연구에서 대기 중의 산소 농도는 21%(v/v)로 가정된다.

화재는 가연물과 산화제를 필요로 한다. 화재 연구가 주로 구조, 구성, 농도, 연소한계, 발화 에너지, 확산속도 등을 집중적으로 조망하지만, 연소과정의 가연물 구성에서 차지하는 산화제의 영향에 관해 우리에게 알려진 것은 거의 없는 실정이다.

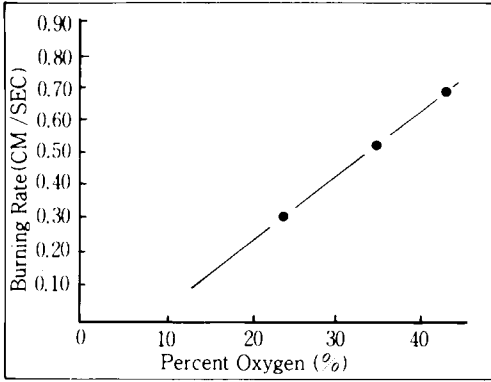
본 논문에서 산화제의 선택이란 바로 산소이다. 왜냐하면, 어떠한 상황에서도 인간은 생명을 지속하기를 원하고, 또 완전히 밀폐된 환경이 갖는 이점 중의 하나는 바로 산소 양을 의지대로 조절할 수 있다는 것이다. 우리는 인명을 위협하지 않으면서도 화재를 감소, 진화하는데 이러한 것을 이용할 수 있다.

【표 1】 Oxygen Indices

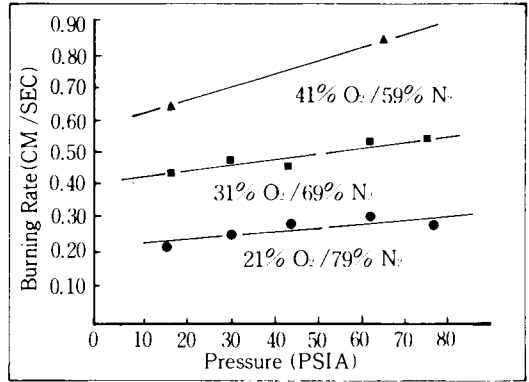
Material	ASTM Oxygen Index
Filter Paper	18.2
Cotton	18.6
Rayon	18.9
Sugar	22.0
Red Oak	22.7
Wood	23.8
3/4" Plywood	24.3
3/8" Plywood	29.2

2. 산소농도에 대한 화재 의존도

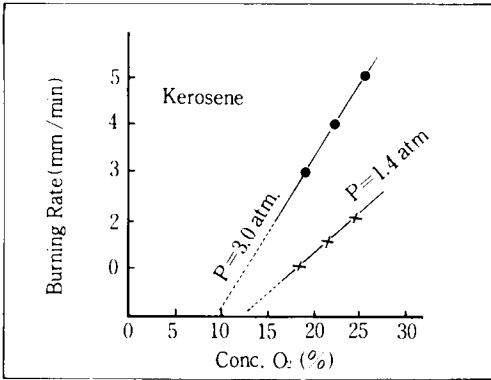
화재는 산소 농도(%)의 미미한 변화에는 민감하게 반응하나, 산소 분압(pO_2)의 변화에는 둔감한 특성을 지닌다. 이러한 사실은 밀폐된 방에서의 화재시험을 통해(확산속도, 열방출, 유해 가스 발생 등을 통제) 연소속도에 미치는 산소 농도와 분압의 영향을 측정해 봄으로써 쉽게 알 수 있다. 그림1은 전체 압력 1atm에서 산소/질소 혼합을 달리했을 때 보여지는 filter paper(수평으로 펼쳤을 때)의 연소 속도를 측정한 것이다. 그림1에서 우리는 산소 농도에 대한 연소 속도의 의존도를 뚜렷이 확인할 수 있다. 질소와 산소 농도를 동일하게 유지한 상태에서 분자량, 열용량, 열전도율 등이 비슷한 다른 물질들을 서로 대체했을 때, 실질적으로 화재에 미치는 물리적 영향은 거의 없었다. 이를 통해 우리는 화학적인 변화에서 산소 농도가 갖는 중요성을 확인할 수 있었다. 한편, 그림2는 가스 혼합물의 전체 압력을 5배 이상 높여도(이로 인해 산소 분압 역시 증가한다) 연소속도에는 거의 영향을 주지 않음을 보여 준다. 우리는 처음부터 끝까지 계속 탈열제로 작용하면서 열기와 mass를 통제하고, 이를 통해 화염 확산을 통제하는 질소의 분압 또는 증가시킴으로써 이러한 결과에 대한 부분적인 해답을 얻을 수 있다. 그림2에서 주목할만한 또 하나의 사실은, 산소 농도를 21%, 31%, 41%로 변화시켰을 때 나타나는 연소속도의 변화이다. 이를 통해 우리는 또다시 산소 농도의 중요성을 확인할 수 있다.



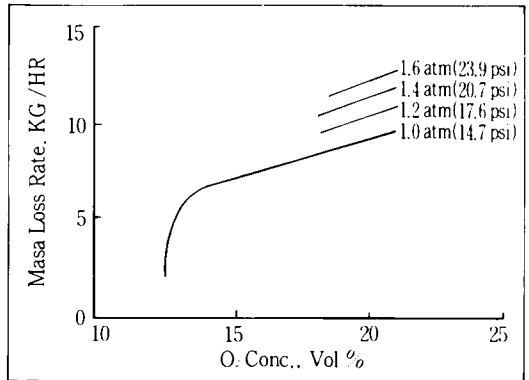
【그림1】



【그림2】



【그림3】



【그림4】

그림3과 그림4는 산소 농도에 대한 액체 가연물 연소속도의 의존도 역시 상당히 높다는 것을 보여준다. 그림3은 kerosene, 그림4는 methyl alcohol에 대한 자료이다. 이 두 종류의 자료가 뚜렷이 구별되는 것은 대부분 그 시험 조건과 시험의 기하학 때문으로, 시험의 기하학은 연소속도에 영향을 미치는 가연물의 증발속도에 영향을 주게 된다.

이 자료들은 가연물들이 그 농도 아래에서는 연소를 지속할 수 없는 한계선인 산소 농도의 하한을 암시한다는 점에서 흥미롭다. 전술한 바와 같이, 연소하한에 대한 연구와 수많은 가스들의 연소하한 그리고, 특정 가연물에 대한 산소 농도의 하한에 대해서는 지금까지 포괄적으로 연구가 진행되어 왔다. 그림1-4는 산소 농도가 고체와 액체 화제에도 기체에서와 동일하게 작용한다는 것을 보여 준다. Oxygen Index(화재 확산을 촉진할 수 있는 산소 농도의 하한)에 대한 개념은 이미 잘 알려져 있고, 또 이를 측정할 수 있는

ASTM 장비와 절차 역시 마련되어 있다. 그러나 ASTM 절차에 의해 측정된 Oxygen Index의 한 가지 문제는, 이 절차를 통해 얻어진 산소 농도의 수치가 실제 화재시 해당 물질의 연소에 대한 산소 농도의 하한이 아니라는 반론이다. 이러한 반론의 제거는 시험 대상 물질을 꼭대기에서 발화시켰기 때문이며, 중력의 영향(화재는 하향 연소에 저항하며, 연소 과정에서 생성된 가열 가스는 부력으로 높은 공기층으로 떠오르고 연소되지 않은 물질을 가열하는 데에는 거의 영향을 미치지 않기 때문)이 작용하기 때문이기도 하다. 바닥면에서는 발화되었을 화재라도 높은 곳의 산소 농도에서는 스스로 연소를 중지하게 된다. 실제 화재에서 관측한 자료와 비교해 볼 때, 일관성이 결여된 점도 있다. 표1은 보통의 가연물에 대한 ASTM Oxygen Index인데, 여기서 우리가 잘 아는 물질들이 대기 중의 산소 농도가 21% 이상일 때에는 쉽게 연소한다는 것을 알 수 있다. 또한, 이 표에서 우리는

3/4in. 합판의 연소하한 지수가 3/8in. 합판의 연소하한 지수보다 더 낮다 (즉, 보다 쉽게 연소)는 것에 주목할 필요가 있다. 그러나 우리가 실제 화재 현장에서 경험하게 되는 것은 표면적인 넓은 가연물일수록 빨리 연소한다는 사실이다(예를 들면, 대패밥은 통나무

무 자체보다 훨씬 빨리 연소한다).

다른 화재 특성 요소들 즉, 열기 방출, 발화 등에 대한 측정치 또한 산소 농도에 대한 의존도를 보여 주지만, 연소의 확산만큼 극적이지는 않다.

【표 2】 Oxygen partial pressure in inhabited atmosphere

place/ situation	pO_2 (atm)	Elevation(ft)
Apollo, take-off mode	1.09	
Apollo, flight mode	0.3-0.37	
Sea-level	0.21	0
Denver, Colorado	0.175	5,000
Airline cabin pressure ³	0.16	8,000
Quito, Ecuador	0.15	9,300
Lapaz, Bolivia	0.134	12,000
Pikes peak, Colorado	0.13	14,100

³Commercial airplane cabins are pressurized at ca. 8,000ft equivalent

3. 산소 분압에 대한 인간의 의존도

화재와는 달리, 인간은 우선적으로 산소 분압에 의존(농도와는 무관)한다. 그리고 넓게 분포되는 분압에서도 인간이 놀랄만큼 잘 견딘다는 것도 화재와는 대조적인 것이다(이러한 점에서 인간은 화재보다 훨씬 유연하며 적응력이 뛰어난 것처럼 보인다). 이러한 사실은 산소 분압이 넓게 분포된 상황 하에서 보여지는 인간의 모습을 기록한 표2에서도 잘 나타나고 있다. 인간은 하나의 상황으로부터 그 상황과는 극단적으로 대조되는 다른 상황으로 아무런 대가도 치르지 않고 한순간에 이동하지는 못한다(예를 들면, 고산병과 같은). 지나치게 많은 산소도 인간에게는 독이 될 수도 있다. 그러나, 인간이 소유한 적응력의 범위가 대단히 넓다는 사실은 확실하며, 우리는 이 사실을 아주 유용하게 활용할 수 있다.

4. 밀폐된 환경

표3은 과거 인간이 생존하면서 맡은 바 임무를

수행했던 현저하게 다른 세 가지의 극지환경이다. 이들 각기 다른 환경에서는 화재 특성 역시 다르게 나타난다. Apollo 우주선처럼 산소 농도가 100%인 환경에서 화재는 거의 폭발적이며, 실제로, 1967년 Apollo 우주선 화재에서 발화된 사실을 인식한 순간부터 우주선이 폭발할 때까지 걸린 시간은 불과 15초에 불과했고, 화재가 지속된 시간도 폭발 후 불과 5초 정도에 지나지 않았다. 산소 농도 21%인 잠수함에서의 화재는 우리가 일상 생활에서 경험하는 보통의 화재와 상당히 흡사하다(실제 잠수함에서 발생한 어떤 화재의 경우 보통의 화재보다 격렬하였으나, 그 이유는 아직 완전히 파악되지 않았다.) Sea Lab의 경우, 연구원들이 담배를 가지고 잠수정에 탑승한 후, 성냥이나 라이터를 소지할 수는 없어서 잠수정 내의 히터를 이용하여 담뱃불을 붙이려 했지만 끝내 실패하고 말았다는 것이다.

표3은 산소 농도 수치인 세번째 칼럼을 통제함으로써 화재를, 그리고 산소 분압 수치인 네번째 칼럼을 통제함으로써 인명을 통제할 수 있음을 명확히 보여 주며, 표3에서 이 두 요소들이 결코 동일하지 않다는 사실도 잘 알 수 있다.

【표 3】 Encapsulated environments

Capsule	Total press.(atm)	%O ₂	O ₂ partial press.(atm)
Apollo	0.3	100	0.3
Submarine	1.0	21	0.2
Sea LAB II	7.0	4	0.3

5. 적 용

잠수함처럼 기압 조절이 가능한 완전 밀폐된 유인 환경에서, 우리는 산소에 대한 화재와 인간의 의존도 차이를 활용할 수 있다. 화재의 입장에서, 이러한 차이의 적용 방식은 수동적인 것과 능동적인 것으로 구분된다.

가. 수동적 방식(Passive)

유인 캡슐에 대한 가장 쉬운 수동적인 접근법은 캡슐 내 산소 농도를 21%에 훨씬 못미치게 유지하는 것이다. 이러한 환경은 산소 농도를 처음부터 아주 낮은 수준으로 유지하거나 잠수함의 경우, 새로운 산소를 공급하기 전에 일정 수준까지 산소를 소모하여 조성할 수 있다. 실제로, 현재 미 해군 소속 잠수함들은 산소 농도를 약 17% 이하로 유지할 수 있도록 허용되고 있다. 화재의 관점에서, 산소 농도 17%는 무엇을 의미하는가? 휘발성 액체 탄화수소와 같은 인화성이 매우 높은 물질이 연소를 시작하는 산소 농도의 하한선은 12% 내외이다(희석 가스가 질산인 경우). 이 연소하한은 대기 중 산소 농도 21%에서 9%의 차이가 있다. 따라서 산소 농도 17%라는 것은 4/9이거나, 어떠한 화재도 발생할 수 없는 산소 농도의 대량 절반 수준인 것이다. 그렇다면, 이미 50%는 보호되고 있다는 것인가? 의심할 여지없이 이는 지나치게 단순한 접근법이다. 하지만 인간의 신체 활동을 위협하지 않고도 방화에 필요한 많은 부분을 간단하게 획득할 수 있다는 것도 사실이다. 이러한 설명은 그 외피가 조금이라도 손상될 경우, 즉시 치명적인 환경으로 돌변하는 우주나 해저(군사적이나 상업적인 목적으로) 또는 높은 고도 등의 환경에 처한 모든 유인 캡슐에 적용할 수 있다. 그러나, 명심해야 할 것은 대기 중에서 연소할 수 있는 어떤 물질이 단순히 산

소농도가 17%(Oxygen Index에 따르면)라고 해서 연소하지 않는 것은 아니라는 사실이다. 그러므로 화재 위험에 대해서는 언제나 100%의 방화대책을 수립하여야 한다.

잠수함의 산소 농도를 17%로 유지할 때, 인간의 정신적, 시각적 예민함에 미칠 수도 있는 영향에 대해 우려를 표시하는 사람들도 있었다. 그러나, 미 해군이 실시한 연구에 따르면, 산소 농도가 17%로 유지되는 실내에 사람들은 여러 날 동안 수용했을 때, 어떠한 부정적인 영향도 발견할 수 없었다는 것이다. 또한, 처음에 지척한 대로 인명이 산소 농도가 아닌 산소 분압에 의해 좌우된다면, 위에서 언급한 잠수함에서의 조건들은 Denver나 Colorado에서의 삶의 조건과 별반 다를 것이 없게 된다. Denver나 Colorado 모두 산소 분압은 0.17atm이다. 그러나, 통상 사람들은 Denver보다 훨씬 높은 고도, 따라서 산기 분압이 0.17atm 보다 낮은 지역에서도 정상적인 삶을 유지하고 있다. 여기에서 주목해야 할 것은 대부분의 민간 항공기들이 산소 분압 0.16atm인 약 8,000ft의 고공으로 비행하면서 가압된다는 사실이다(표2 참조)

화재에 미치는 산소 농도의 영향을 확실히 검증하기 위해 미 해군에서 실시한 연구에 의하면, 산소 농도 21%에서 촛불과 종이는 쉽게 발화하였고, 17%에서 촛불은 어렵게 발화하였으며(촛불의 발화는 초의 위치, 즉 똑바로 세웠는가, 45°로 기울였는가 또는 수평으로 했는가에 따라 달라졌는데, 이를 통해 다시 한번 화재 확산에 있어 중력의 중요성을 확인하였다), 산소 농도 13%에서는 아무 것도 발화하지 않았다(사실, 성냥조차 켜지지 않음). 그러나 인간은 이들 농도에서도 여전히 살아 있었다. 따라서 우리는 밀폐된 유인 캡슐 내에서 산소 농도를 낮게 유지함으로써 방화의 많은 부분을 실질적으로 달성할 수 있는 것이다.

【표 4】 N₂ pressurisation

Capsule	Total pressure (atm)	% O ₂	O ₂ partial press.(atm)
Submarine	1.0	21	0.2
Add N ₂	0.7		
	1.7 ^a	12	0.2

^a In diving equivalent to 20 ft water

나. 적극적 방식(Active)

잠수함과 같은 밀폐된 캡슐 내에서 화재가 발생했을 때, 우리는 캡슐 내의 대기를 인간이 살 수 있는 정도의 대기로 유지하면서도 쉽게 화재를 진압할 수 있다. 즉, 캡슐 내에 단지 질소를 주입하는 것만으로도 진화가 가능하며, 표4는 이를 잘 보여주고 있다. 표4에서 우리는, 325㎡의 실내(FIRE I at NRL)에서 활발하게 진행 중인 화재도 질소를 주입하여 산소 농도를 약 12% 정도로 낮추면(산소를 연소, 회식 또는 두 가지 모두를 통해) 수 초만에 진화된다는 것을 알 수 있다. 이는 Coward와 Jones의 최초의 발견 또는 지금 우리의 연구작업을 확실하게 입증해 주는 것이다. 이 실험을 통해 우리는 질소를 주입한 소화과정으로 인해 쥐(인간의 실험 대용물로서)에게 가해진 위해가 전무하다는 것도 확인되었다. 질소 주입 소화법은 밀폐 및 반밀폐 유인 공간에 대한 방화활동에 새로운 장을 연 것이다. 남은 문제는 질소 주입 소화법을 활용할 수 있는 방법에 관한 것이다.

완전히 밀폐되지 않은 유인 공간에서 산소 농도를 감소시키는 방법 중 적극적인 방호법의 또다른 형태는 공간의 배기량을 조절하는 것이다. 배기량 조절을 통한 소화법으로 잘 알려진 것은 공간을 폐쇄함으로써 화재를 질식시켜 소화하는 것이다. 주거 공간에서 Air-conditioning의 확산이란 관점에서 보면, 배기량을 조절하여 연소를 촉진할 수 있는 산소 농도를 감소시킴으로써 많은 것을 얻을 수 있다. 가장 단순한 배기량 조절법의 하나는 “Smoke curtain”을 사용하는 것이다. 일견, Smoke curtain은 화재로부터 흘러 나오는 연기의 확산을 감소시키기 위한 것으로 보인다. 그러나 Smoke curtain의 실질적인 용도는 화재로 흘러 들어가는 산소를 감소시키는 것이며, 산소를 차단함으로써 연소 속도를 늦추는 것이다. Smoke curtain만을 사용하는 것으로서 NRL 시험 선박에서의 화재를 최소화하고 진화하는 데 성공적이었으며, USS Conyngham에서 우발적으로 발생한 실제화재를 진화하는 데에도 매우 유용하였다. 배기량 조절을 통해 화재를 통제하고자 하는 방법은 아직도 많이 연구되어야 할 분야이지만, 이 방법에 잠재된 단순성을 염두에 둔다면, 지금보다 많은 연구 작업이 필요하다.

4. 맺는 말

화재가 산소 농도에 민감하다는 것을 생각할 때, 우리는 왜 대기 중의 산소가 21%이며, 또 지금까지 그러했는가를 생각해 보아야 한다. 이 수치는 얼마나 단단히 고정되어 있는가, 또 인류와 문명의 발전에 있어 이 수치가 갖는 의미는 무엇인가? 대기 중 산소 함유량이 약간 달랐다면 즉, 23%나 19%였다라면, 인류가 현재 수준의 문명과 문화를 발전시킬 수 있었을까? 아마도 불가능했을 것이다. 지금껏 인간의 기술적 발전은 화재와 대단히 밀접한 관련을 맺고 진행되었을 뿐 아니라 지나치게 화재 의존적인 것이다. 그리고 지금의 대기와는 다른 산소 농도 하에서의 화재특성 또한, 지금 우리가 알고 있는 것과는 매우 다른 것이어서 산소 농도의 활용과 통제에도 커다란 영향을 미칠 것이다.

또한, 초창기 지구의 대기가 지금처럼 산화적(oxidising)인 것이 아니라 환원적(reducing)인 것이었다는 증거는 아주 많다. 대기는 왜 그리고, 어떻게 바뀌었는가? 왜 21%에서 멈추었는가? 인간의 입장에서 이것은 참으로 다행스러운 일이다. 왜냐하면, 지구의 역사에서 볼 때, Homo Sapiens는 아주 운 좋은 신출내기여서 지구상에 그가 등장할 때까지 지구의 대기는 이미 아주 오랫동안 산소를 걸르고 걸러서 21%로 만들어 놓았고, 이 수치의 산소를 마시며 인류는 무난히 진화할 수 있었기 때문이다. 그러나, 지금까지 살펴 본대로, 이제 Homo Sapiens의 지체는 적어도 원하지 않는 화재를 통제할 수 있을 만큼 발전하였다. 그리고 아직도 계속되는 화재로 인한 엄청난 손실(미국에서만 매년 5,000명이 화재로 사망)을 생각해 볼 때, Homo Sapiens는 지금보다 많은 노력을 경주하여야 한다.

〈본 논문은 Loss Prevention News(94.7.9)를 정리한 것임〉