

건재·가구등에서 발생하는 연기의 특성

자료/협회발간「방화정보」에서

1. 서론

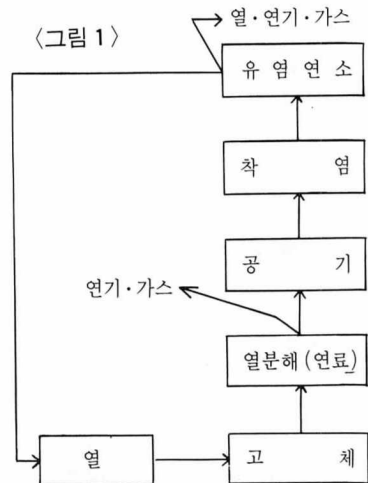
건재나 가구 등 건물내의 수용물이 났을 때 발생하는 연기의 독성에 의하여 귀중한 인명을 잃는 문제는 1971년 대연각 호텔 화재 이후 대형 건물로부터 일반 주택의 화재에 이르기까지 크고 작은 여러 화재사건에서 연기의 독성이 사인이었다는 사례가 적지 않았기 때문에 우리의 큰 관심을 갖게 되었다. 구미 여러나라에서의 화재에 의한 희생자 사인분석을 보면 사망자의 약 80%가 연기의 독성에 연유하고 있는 것으로 보고 되어 있다. 일본의 경우도 연기의 독성이 직접 사인으로 되고 있는 것은 약 40%이지만, 연기로 인해 행동 불능이 되거나 기절하는 것을 감안하면 그 비율은 약 70% 정도가 되리라는 전문가의 견해도 있다. 한편 우리나라는 약 49%로 집계되고 있다.

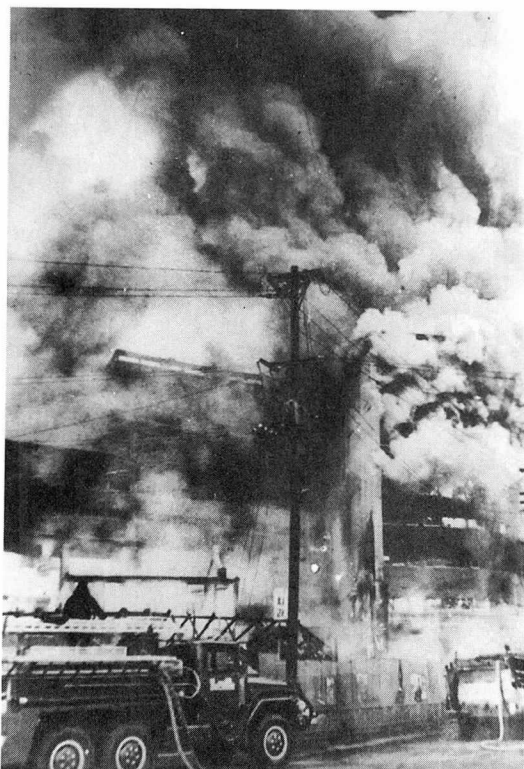
화재가 났을 경우 충분한 시간이 있고 기능장애와 물리적인 방해(예컨대 잠겨진 문, 부적합한 피난로 등)가 없다면 안전한 피난이 가능하겠지만, 화재시에는 고온의 공기나 연소가스를 흡입함으로써 갖가지 생리학적, 행동학적 증상이 나타나 공포심을 갖게 된다. 이러한 상황은 시야를 흐려 신체적 행동불능, 운동기능의 상실, 오판, 장소의 오인, 통찰력의 억제 및 Panic 등의 원인이 되며, 게다가 피난이 늦거나 하면 유해가스를 점점 더 마시게 되고 화열로 상해까지 입게 되어 나중에는 치사에 이르고 만다. 설사 화재로부터 구조됐더라도 유해가스의 흡입이나 화상에 의한 후유증도 문제가 된다.

2. 연기의 독성

연기란 「공기 중에 부유하는 고체, 액체 미립자 및 재료가 열분해 혹은 연소했을 때 발생하는 가스의 복잡한 혼합물」이라 정의하고 있다. 어떤 재료는 연소시 100종 이상의 화학성분이 검출되기도 하는데 특정 재료의 생성물에서조차 그 발생 성상은 연소조건에 크게 좌우된다. 고체 재료에 관한 화재시의 연소형태는 대체로 <그림1>에 나타난 과정을 밟는다. 실제 화재에서 산소는 공급량보다도 빨리 소비되는 경우가 많으므로 산소 결핍상태가 되어 일산화탄소(CO) 등의 유독성분이 많이 생성되게 된다.

재료의 연소·열분해 생성 가스에 관한 연구는 특히





화학분야에서 많이 진행되어 왔는데, 이들은 대부분 고진공중 또는 질소(N₂), 헬륨(He) 등의 불활성 기체 중에서의 열분해에 의한 것이고, 실제 화재시의 재료의 연소조건과는 상당히 다르다. 그런데 최근들어 화재시에도 적용할 수 있는 연구가 각 분야에서 행해지게 되었다. 재료는 함유원소의 종류에 따라 각각 특유의 유독가스를 생성하는 것이 명백해지고 있다.

일반적으로 유기질 재료는 연소시 일산화탄소(CO)와 이산화탄소(CO₂)를 모두 발생한다. 이들 가스는 가열시의 공기 공급량과 밀접한 관계가 있어, 공기 공급량이 많으면 이산화탄소의 생성량이 많고, 공급량이 적으면 일산화탄소의 생성량이 많아진다. 셀룰로오스계 재료의 주요 연소생성가스는 일산화탄소와 이산화탄소이며 훈소시에는 알데히드, 아크롤레인 및 산류 등도 발생한다. 또 일산화탄소의 발생은 300~400°C에서 시작된다. 플라스틱 재료는 일산화탄소 및 이산화탄소와 함께 다음과 같이 함유원소의 종류에 따라 재료 특유의 유해가스를 발생한다. 즉 화학구조 중에 염소(Cl₂)를 함유한 재료는 300°C의 저온에서부터 화재 최성기의 고온에 이르기까지 염화수소(HCl)를 발

생하는데 이들 재료 중 염소는 가열온도·공기공급량의 변화에 영향받지 않고 거의가 염화수소로 전환한다. 화학구조 중에 질소(N₂)를 함유한 재료는 400~500°C에서 시안화수소(청산가스 HCN)를 발생하고 일반적으로 고온이 될수록, 또 공기가 부족할수록 많아진다. 그러나 폴리아크릴로니트릴은 200~300°C에서도 시안화수소를 생성한다. 시안화수소 생성량은 거의 함유 질소량에 비례한다. 또한 이들 재료는 암모니아(NH₃)를 발생하며 공기가 부족할수록 그 생성량이 많다. 그리고 유황(S)을 함유한 재료는 이산화유황(아황산가스 SO₂)과 황화수소(H₂S)를 발생한다. 일반적으로 플라스틱 재료는 특히 저온이거나 공기 부족시에 각 단량체(monomer)나 각종 탄화수소를 많이 발생한다. 폴리에틸렌, 폴리프로필렌은 훈소시 알데히드, 아크롤레인 및 저급의 지방산을 발생한다.

이들 결과를 화재시에 적용해서 검토해 보면 건물내의 재료 사용량 및 가스의 독성으로 보아 화재시 특히 문제가 된다고 여겨지는 것은 일산화탄소, 이산화탄소, 염화수소, 시안화수소, 알데히드 및 아크롤레인이며 거기에 부수적인 산소결핍일 것이다. 이 중에서 시안화수소의 독성은 특히 높아 화학구조중에 질소를 함유한 재료는 주의를 요한다. 이들 가스의 생성량은 화재초기의 온도(약 300~800°C)에서 공기의 공급 조건에 달려 있으나 반드시 모두가 명확하지는 않다. 재료 연소시의 생성물의 유해성을 평가하기 위해서는 각종 온도나 공기 공급조건하에서 재료의 발생 가스 성상이나 대표적 유해가스의 생성량 등에 대하여 일반적 결론을 유도할 필요가 있을 것이다.

가. 일산화탄소(CO)

연기 흡입에 의한 중독의 주요 원인으로서 일산화탄소가 가장 일반적이다. 주지하다시피 흡입된 일산화탄소는 혈액 중의 헤모글로빈과 결합해서 세포로의 산소 운반기능을 저해하여 질식사하게 한다. 일산화탄소를 마셨을 때 인간의 반응은 대략 <표1>에 나타난 것과 같으며 화재시 실내의 공기는 수천 ppm 농도까지 되는 것이 보통이다.

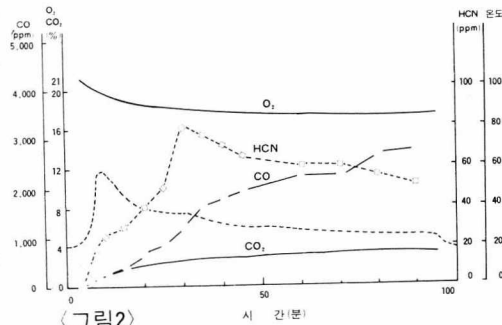
치사에 이를 때의 혈중 일산화탄소 헤모글로빈 포화도는 70~80%로 알려져 있는데 화재에 의한 희생자의 혈중농도를 측정하면 사인이 일산화탄소인지 아닌지를 어느 정도 판단할 수 있다.

〈표1〉

CO 농 도(PPM)	작 용
100	수시간으로 안전
400~500	1시간으로 영향 없음
600~700	1시간으로 감지할 수 있는 영향 있음
1000~1200	1시간으로 불쾌
1500~2000	1시간으로 위험
4000	1시간 미만 흡입으로 치사
10000	1분으로 치사

나. 시안화수소(HCN)

시안화수소는 작용이 가장 급격한 독물의 하나이다. 이 가스가 화재시 인간의 치사에 미치는 영향은 일산화탄소만큼 분명치는 않다. 시안화수소의 독작용은 세포내에서 산화반응의 촉매작용을 행하는 산화효소의 활성을 저해하는 데에 있으며 그로 인해서 세포 호흡의 정지를 초래한다. 시안화수소의 독성은 일산화탄소



〈그림2〉

보다도 급성으로 고농도의 가스를 흡입하면 거의 순간적으로 허탈하여지고 호흡이 정지된다. 저농도에서는 눈의 점막 자극, 폐의 통증, 현기증, 맥박수, 호흡심도, 호흡수의 증가, 두통, 구역질, 구토 등의 증상이 나타난다. 화재에 의한 희생자의 분석으로 시안화수소의 독작용을 확실히 밝히는 것은 전술한 일산화탄소의 경우보다 곤란하다. 그 이유는 혈중 시안화물의 양이 측정 시료의 보존 상태에 따라 변하기 때문이다. 탄, 탄 재료가 분명하다면 어느 정도의 추정능 가능하다. 예를 들면 〈그림2〉는 아크릴 섬유로 채워진 방석 약 20장이 방에서 탄 것만으로 잠자던 아이 두 명이 사망한 어느 화재사례를 재현한 실험에서의 실내 가스 성분의 분석 결과이다. 이 경우 실내의 시안화수소 가스 농도, 희생자의 혈중 일산화탄소 헤모글로빈 농도 등로부터 이 사례의 사인에는 일산화탄소와 함께 시안화수소가 관여되었다고 추정할 수 있다.

다. 자극성 가스

화재가스에 함유되어 감각기관이나 폐를 자극하는 성분(할로젠산, 알데히드 등)의 작용은 실험동물을 이용한 조사 결과에 의하면 호흡률을 저하시키고 때로는 중대한 산소결핍증을 초래한다. 대표적인 자극성 가스인 염화수소는 물에 쉽게 녹고 눈, 코, 목의 점막을 자극, 기도를 파괴해서 기계적인 질식사를 초래한다. 마우스를 이용한 실험에서는 노출된 후, 폐의 합병증에 의한 사망을 볼 수 있다.

라. 이산화탄소(CO₂)

보통의 화재에서 볼 수 있는 농도는 〈표2〉에 나타난 바와 같이 특히 유독하다고 할 정도는 아니나 적절한 농도는 호흡률을 증가시킴으로써 유독물이나 자극물의 흡입을 증가시키는 효과가 있다.

〈표2〉

CO ₂ 농 도(%)	작 용
2	호흡률 50% 증가
3	호흡률 2배
5	고통스럽고 호흡곤란이 되도록 1시간 정도의 흡입으로는 중대한 후유증을 남기지 않는다.

마. 산소결핍

호흡중 산소량이 저하되면 폐포로부터 혈액중으로의 산소 이행량이 적어져 생체조직으로의 산소 공급량이 감소한다. 그 때문에 〈표3〉에 나타난 것과 같이 소위 산소 결핍증이 나타난다. 화재시 피난자가 산소 결핍만으로 치사에 이르는 예는 적다고 생각되지만 뇌의 기능을 저하시킴으로써 정확한 판단력과 행동을 저해한다는 의미에서 주의를 요한다.

〈표3〉

산소농도	작 용
21%에서 17%로 저하	운동근육의 조절을 저해한다.
14%에서 10%로 저하	의식은 있지만 판단을 흐리게거나 피로를 느낀다.
10%에서 6%로 저하	실신하거나, 사망을 막기 위해서는 수분내에 공기 또는 산소에 의한 소생이 필요

바. 기타의 가스

이산화질소(NO₂), 암모니아, 할로젠산, 이산화유황, 아크롤레인 등의 발생원과 독성 작용은 전술한 시안화수소, 염화수소를 포함해서 〈표4〉에 나타나고 있다.

〈표 4〉

유해 성분	발생 원	작 용	10분 노출에서 의 치사농도추 정 (ppm)
HCN	양모, 견사, PAN, 나일론, 폴리우레탄, 종이	질식에 의한 즉사	350
NO	직물에서 소량 셀룰로우스, 니트레이트, 셀룰로이드로부터 대량	폐에 강한 자극 농도에 따라 사망 또는 후유 증	200
HCl	PVC, 난연처리재료	호흡계에 자극, 미립자상의 HCl의 독성은 같은 형태의 가스의 HCl보다 크다.	500 미립자가 없을 때
NH	양모의 연소, 견사, 나일론, 벨라민, 통상의 건물화재에서 농도는 낮다.	눈, 코에 자극	1000
타 할로겐산가스(HF, HBr,)	불화수지 피름, 휘소함유의 난연화재료	호흡에 자극	HF 400 HBr, 500
SO	유황함유물	강한 자극, 폐·성문의 수종	500
이소시아네이트	폴리우레탄	호흡계에 강한 자극	100(TDI)
아크롤레인	폴리올레핀의 열분해, 저온도의 셀룰로우스	호흡계에 강한 자극	30에서 100

3. 재료관리에 의한 대응

건축물에서는 병원, 백화점, 극장 등 특수건물의 내장재에 대하여 제한을 하고 있으며, 방화재료에 대해서도 연소확대 및 연기 발생에 관해서 화재시 안전성을 평가하는 시험방법(기재시험 및 표면시험)을 정하고 있다. 여기에서 연소생성물의 유독성 면에서 방화재료의 안전성을 평가하기 위한 시험방법이 정해져 있기 때문에 방화재료 중 준불연재료 및 난연재료는 이 시험에 합격하도록 되어 있다. 그러나 불연재료는 유독가스 발생은 있다 하더라도 그 발생량이 아주 적으므로 이 시험을 할 필요는 없다.

연소생성물의 독성 평가에는 가스분석시험에 의한 것과 동물시험에 의한 것이 있다. 전자에 의한 평가를 함에 있어서 연소생성물의 조성이나 양을 기기분석 등에 의하여 모두 확실하게 하는 것이나, 다수 성분의 유독 가스가 복합되어 있는 연소생성물이 종합 독성을 개개의 성분 가스의 독성으로부터 평가하는 것 등은 현재의 학문적 또는 기술적 수준으로는 곤란한 경우가

많다. 그래서 이 가스유해성 시험은 연기나 가스를 함유한 연소생성물 전체를 동물에 흡입시켜 그 유독성을 종합 평가하는 방법을 채용하고 있다. 이 평가는 시험재료의 연소생성물이 표준재료인 목재(나왕)의 그것보다 안전한지 어떠한지를 판정하는 상대적 평가이다.

이와 관련, 외국에서는 유럽을 중심으로 한 국제표준화기구(ISO)에서 독성 평가방법의 국제규격을 만들기 위해 연구자료의 교환 및 검토가 행해지고 있다. 또 미국에서는 ASTM에서 독성 시험법의 규격화를 목표로 위원회를 설립했다.

ISO에서는 독성이 높은 재료를 가려내는 방법의 개발을 목표로 1981년까지는 DIN법과 NBS법을 검토해 왔는데 결론을 못내고, 현재 새로운 4개 작업부를 설치하여 검토를 계속하고 있다. DIN법은 원래 고분자 화합물의 열분해 생성물을 분석하는 시험법으로써 이를 독성 시험에 응용했던 것인데 독일에서는 현재도 이 시험법을 근간으로 하고 있다. 한편 미국 국립표준국(National Bureau of Standards)에서 개발된 NBS법은 재료관리에 이용되는 것이 적절치 않은 것으로 평가되고 있다.

연소생성물의 발생량이 적은 재료일수록, 또 독성이 강한 가스의 발생이 적은 재료일수록 화재시 안전성이 높은 것은 당연하기 때문에 연소생성물의 유독성 대책을 재료적으로 행하려면 난연처리 등의 적당한 방법에 의해서 재료의 연소량을 줄이고, 또 독성이 강한 가스를 발생하는 성분을 줄이는 것이 필요하다. 그러나 이들은 전술한 바와 같이 연소조건에 따라 좌우되므로 실제 화재시 조건의 적용이 중요하다.

금후 연소독성의 연구는 물질 혹은 재료 단독에 대해서 뿐만 아니라 실제 사용 상황을 감안하고 또 실제 화재의 연소성장을 재현한 조건에서 평가되는 방향으로 관심이 모아지고 있다. 또한 독성에 관한 안전성 향상을 위해서는 발연성, 착화성, 연소 속도, 화염전파성 등의 평가 방법 및 건물의 방재성상과의 유기적 결합이 필요하게 되는 등 지금까지와는 좀 다른 방향으로 나가는 상황에 있다. 단, 재료의 적절한 독성 평가방법의 개발이 선행되어야 한다는 것은 두말할 필요가 없다.

앞으로의 방향은 실제 화재에 있어서 재료의 연소성상의 파악과 그것을 재현할 수 있는 실험 장치의 개발 및 적절한 평가 판정법의 개발이 주요 과제가 된다. ㉞