

화재생성가스의 독성(상)

1. 독성의 문제점

미국에서는 화재로 매년 수천명이 사망하고 수십만 명이 부상, 수십억달러의 재산피해를 내고 있다. 과거 100년간 인명 및 재산의 방호는 크게 진보하였으나 화재는 아직도 큰 문제가 되고 있다.

화재에 의한 사망 원인은 주로 「열상」과 「연기 흡입」으로 나눌 수 있는데, 이 두 용어는 잘못 이해되는 경우가 있다. 열상에는 화상이라는 세포의 파괴 뿐만 아니라 몸이 발한으로 열을 교환(빼냄)하여 체온을 조절할 수 없게 되었을 때 발생하는 열 스트레스도 포함하고 있다. 눈에 보이는 공중에 뜬 미연소 가연물인 연기는 시계를 차단하는 요소이나 직접 장해를 발생시키는 요소는 아니다. 장해는 대부분이 연기 중에 있는 보이지 않는 유독가스를 흡입함으로써 발생하는 것으로, 유독가스는 피부로는 거의 흡수되지 않는다. 또한, 연소하고 있는 방의 공기 중 산소가 결핍되어 장해가 발생하는 일도 있다.

연기의 흡입은 소사의 원인 중 대부분을 차지하며, 그 비율은 점점 높아지고 있다. 연기의 흡입에 의한 사망은 1978년에 전체 소사자의 3/5 이하였으나 1992년에는 약 3/4으로 증가하였는데 이는 매년 약 1%의 증가 비율을 나타내는 것이다. 그것은 인구 증가를 감안할 때 연기 흡입에 의한 소사자의 절대수가 크게 감소하고 있음에도 불구하고 열상에 의한 소사자의 절대수가 보다 급속히 감소하고 있기 때문이다.

따라서, 연기중독이 주된 메커니즘이므로 이것을 문제로 하는 것이다. 연기 흡입에 의한 소사를 방지하는 대책은 열상에 의한 것보다 3배의 효과가 있다. 열상을 입고 나중에 사망하는 자, 열상과 연기 흡입의 합병으로 사망하는 자 및 열상 또는 연기 흡입만으로

사망하는 자가 있다. 그러나, 이는 연기 흡입에 비하면 얼마 되지 않는다.

연기 흡입은 대다수는 아니지만 화재상해의 원인이기도 하다. 예를 들면, 1989년부터 1993년까지 5년간의 전체 화재상해건수의 42%가 연기중독에만 기인한 것으로, 열상이 29%, 열상과 연기 중독의 병합이 17%, 기타가 13%이었다. 게다가 공기 중에 부유하는 연기 등의 불안전 연소가스도 재산손해의 중요한 요소로 인식도를 더하고 있다.

2. 연기 중독의 문제

연기 중독이 소사의 주된 메커니즘이라고 해서 소사를 방지하는 수단으로 연기 중독으로 어떻게 사람이 죽음에 이를까를 보다 깊이 이해하는 것이 필요하거나 효과가 있는 것은 아니다. 화재사태에 일정한 패턴이 있어 그것을 인명방호에 도움이 되도록 하려면 그에 대해 무엇인가 할 수 있는 것이 있어야 한다.

예를 들면, 남성은 여성보다 화재로 인한 사망자가 많지만, 인명방호를 위해 여성으로 성전환 수술을 하고 싶어하는 남성은 별로 없을 것이다. 또한, 보다 진지하게 생각해서 모든 인명방호대책은 방화지로나 기술에서 남녀를 동일한 대상으로 하고 차이를 두지 않는다. 남성만을 대상으로 한 대책을 세울 수 없는 것은 아니지만, 그러한 우선 순위를 매긴 대책은 역효과가 날 것이라는 사람도 있다. 반수의 사람들(여성)을 무시하는 대책은 필요없을 뿐만 아니라 여분으로 비용이 들 따름이다.

모든 화재에서 유독 물질은 발생한다. 우리들이 사용하는 재료가 화재로 인해 어떻게 사망하는가가 달라질 뿐 사망하지 않도록 하는 것이 아니라면 바꿀 이

유는 없다. 사실 이것이 연기의 독성 문제가 그다지 두드러지게 취급되고 있지 않은 주된 이유일지도 모른다. 연기 중독사의 메커니즘에 대해 우리들은 소사를 방사하는 방책으로서 연기의 독성 이외의 소방 전략이 최선이라고 배워 왔다.

이 점에 대해서 상세하게 검토하기 전에 화재에 의한 독성가스의 발생과 최근에 채택된 독성시험에 대해 연구하지 않으면 안된다.

3. 열은 탄소를 바탕으로 한 생명체

「지구상의 생명은 탄소를 바탕으로 하고 있다」는 과학피선잡지의 기사를 읽은 사람도 있을 것이다. 거의 모든 화재에서 연소물은 목재, 먼 등 재생 가능한 것에서 천연가스, 석유 및 플라스틱 등 유도체에 이르기까지 유기물질이다. 유기분자에는 탄소가 많이 함유되어 있어 화재는 산소원자를 유기화합물 속에 던져 넣음으로써 열에너지 발생을 화학반응이다. 따라서 대부분의 화재에서 발화 전과 비교하여 공기 중의 산소가 감소하고 일산화탄소(CO)와 이산화탄소(CO₂)가 증가한다.

기타 독성물질이 발생하기 위해서는 모든 연료에 반드시 함유되어 있지 않은 다른 원자가 있어야 한다. 시안화수소(HCN)가 발생하는 데는 모든 유기물질에 포함되어 있는 질소(N), 수소(H) 및 탄소(C) 원자가 필요하고, 염화수소(HCl)는 염소(Cl) 원자가 필요하다는 식이다.

이것을 인명방호전략에 대입시켜 보자. 만약, 화재에 의한 사상의 대부분이 산소 결핍 및 CO와 CO₂의 흡입에 의한 것이라면, 화재의 경우, 대기 중의 산소가 결핍되고 CO와 CO₂가 반드시 발생하므로 화재의 독성만을 대책으로 한 인명방호전략을 개선하려는 것은 의미가 없다. 재료를 바꾸어 착화하기 어려운 것으로 하면 되는 것이다. 또는, 표면의 연소속도를 지연 시킴으로써 난연성으로 할 수 있다. 최고열방출율을 낮추어 화재가 피크에 도달하는 것을 늦추고, 고열의 발생을 늦추어 대기 중에 유독 물질이 방출되는 것을 억제하기 위해 재료를 바꿀 수도 있다. 그러나, CO와 CO₂를 없앨 수는 없다.

시안화수소, 염화수소 및 기타 많은 유독 물질은 제거할 수 있다. 따라서 유독 물질의 방어진략은 제거

가능한 공동 화재생성 유독가스의 발생을 적게 하는 대책이다.

그 문제는 더 나아가서는 화재의 종류와 사람들에 대한 독의 영향(어느 정도 사람에 따라 다르다)으로 이어지는 가연물의 종류와의 복잡한 관계를 보다 깊이 이해할 수 있는가에 달려 있다. 이것을 장소와 시간의 연속으로 생각해 보면 이해하기 쉬울 것이다.

건물 내부에는 화재가 발생하기 전에 각종 물품, 살림살이 및 사양재료라는 가연물이 존재한다. 이들 물건은 많은 부분으로 이루어져 있고 여러 종류의 물질로 만들어져 있다. 만약, 쇼파에서 발화하면 가장 먼저 바깥 층의 커버가 인화하고, 그 후에 커버의 천과는 전혀 별개의 물질인 충전물이 타기 시작하는데, 그 전후에 제3의 물질인 덧댄 천이 타 없어진다. 그러나, 충전물은 세 가지 물질 중에서 가장 대량의 가연물이다. 세 가지 물질은 연소하여 하나의 화재로 합체할 때에 각종 유독가스를 발생하는데, 화재가 확대됨에 따라 유독가스의 발생률도 증가한다.

화재는 특히 환기구가 적어서 완전 연소를 위한 신선한 공기를 끌어들이지 못하기 때문에 실내의 산소가 상당히 감소했을 때는 같은 물질이라도 유독가스의 발생량이 다르다. 예를 들면, 문이나 창이 열려 있어 충분한 공기가 들어오는 화재에서는 다량의 산소가 존재한다. 산소는 가연물의 열분해로 발생하는 증기 속에 있는 탄소가 결합, 일산화탄소의 분자가 된다. 게다가 화학반응이 진전하여 CO에 산소원자가 더해지면 CO₂의 분자가 된다. 산소가 적은 경우에는 CO에서 CO₂가 되는 최후의 화학반응이 일어나기 어려우므로 CO₂에 대한 CO의 비율이 압도적으로 증가한다.

한편, 발생한 유독물질은 이동하여 사람들에게 위해를 가한다. 발화 초기에 발생하는 유독가스는 발생 장소에서 천천히 떠돌며 그다지 확산되지 않아 좀처럼 치명적인 농도가 되지 않는다. 그 후 Flash Over 후에 발생하는 유독가스는 고열에 의해 급격히 속으로 밀어내졌다가 신선한 공기와 산소를 구해 나아갈 때 옥내로 끌어들여진다. 가스, 검댕 등의 화재생성물질은 화점에서 재실자에게로 퍼져나가는 도중에 낙하여 물체의 표면에 부착되지만, 이들 물체는 착화될 때까지는 인체에 위협은 없다. 다른 유독가스는 화학적으로 상호작용하여 각종 혼합비율이 된다.

재실자는 연기를 보면 그 반대방향으로 피난하기 시

작한다. 그것은 통상의 피난로보다 어렵고, 익숙하지 않은 피난로이므로 피난시간은 보다 길어질지 모르지만 이 시점에서는 아직 인체에 위험은 없다. 피난자는 최초에 어느 정도 가스를 흡입한 시점에서는 민첩성은 조금 떨어질지 모르나 피난은 계속할 수 있다. CO 등의 유독가스는 혼란, 현기증 및 피로를 일으키고 염화수소 등의 자극성가스는 눈을 자극하여 눈을 자극하여 눈물이 나게 하며, CO₂ 등의 가스는 호흡을 가쁘게 하고, 다른 유독가스의 영향을 앞당긴다. 피난자는 아직 움직이면서 피난을 계속하려 하지만 잘 보이지 않게 되고, 호흡이 곤란해지며, 방향감각을 상실하여 더 위험한 방향으로 가게 되는 수가 있다. 그 다음에 몸이 말을 잘 듣지 않게 되어 의식불명이 되어서 최후에 구조가 적절하게 이루어지지 않으면 사망한다.

각 단계에서 개인의 건강에 따라 독성의 영향이 달라지기도 하고 느려지기도 한다. 예를 들면, 상습흡연자는 이미 체내에 CO를 축적하고 있고, 알콜중독자나 마약사용자는 이미 정신적으로 장애가 있다.

그러나, 연기로 앞길을 차단당하고, 염화수소로 눈이 보이지 않게 되며, CO₂로 호흡이 격해져 피난행동이 지연되고, 시안화수소로 몸이 말을 듣지 않게 되어, CO로 최종적으로 죽음에 이른 사람을 어떻게 표현하면 좋을까. 그와 같은 경우, 무엇으로 인해 사망한 것일까? 그리고, 어떠한 시험 또는 분석으로 이와 같은 복잡한 과정의 모든 면을 포착할 수 있을까?

4. 연소에 의한 유독가스의 생성과정

유독가스가 생성되는 최초의 단계는 물질의 연소이다. 물질은 난연성이 방화에 관한 가장 중요한 성상이나, 그것이 연소 생성가스의 독성실험에서는 제외되는 경향이 있다. 일반적으로 연소의 독성실험은 물질이 착화해서부터 측정이 개시되고 있다.

치명적 유독가스가 생성되는 제2단계는 물질 전체가 불에 휩싸인 때이다. 만약, 그 물질이 쇼파, 벽, 바닥의 카펫 등 큰 물건이라면 그 전체가 불에 둘러싸인 속도는 물체표면의 화염확대율에 의해 결정된다. 여기서도 연소독성시험은 보통 물질의 작은 조각만이 시료로 사용되고, 화염확대율을 측정하도록 계획되어 있지 않다.

예를 들면, 몇겹의 커버, 충전재 등 각종 재료로 만

들어진 쇼파에 대해 검토해 보자. 각 층에서 발생하는 유독가스의 양(매분 발생량)과 성상(특정량의 위험성)에 대해 대다수의 많은 연소독성시험은 실제로 사용되고 있는대로의 시료를 취해 시험하고 있다. 그러나, 피츠버그대학의 시험에서는 각 시료를 한꺼번에 으깨어 알갱이로 하여 테스트하고 있다.

사실, 각 층의 영향을 파악하는 것은 쉽지는 않다. 난연성의 커버로 피복된 시안화칼륨 벽돌을 생각해 보자. 만약 그 커버가 두꺼워서 충분히 화염에 견딜 수 있는 것이라면 벽돌은 빌딩이 전소할 때까지 연소하지 않으므로 안전하다고 자신있게 말할 수 있을 것이다. 그러나, 내부가 무엇인지 알면서 안전하다고 자신있게 말하려면 커버에 어느 정도의 내화성이 있어야만 할까. 사실, 도시버스의 좌석은 종종 방화의 대상이 되고 있으므로 좌석의 각 층에서 시료를 취하여 시험이 행해지고 있다.

물질의 복잡한 구조와 화재의 초기단계에 대해 연구하려면 수리적 분석이 필요할지도 모른다. 만약, 어느 제품 전체가 불에 휩싸이는 과정이 시험으로 명백해지지 않으면 화재 모델, 계산 등 다른 방법으로 대응해야만 한다. 그렇지 않으면 제품의 연소독성은 제품전체가 불에 휩싸였을 때에 발생하는 가스의 양과 독성의 강도만으로 결정해야 하지만, 이것은 실제 화재에서는 그다지 중요하지 않은 성상을 대상으로 하고 있으므로 틀리기 쉬운 방법이다.

5. 독성의 강도와 초유독가스

각 유독가스는 각각 발생량이 다르고, 치사량도 다르다. 이 경우, 독성의 강도는 사람을 사망시킬 만큼의 효과를 내는데 필요한 유독가스의 양을 의미한다.

각 화재 생성가스의 독성이 어느 정도 다른가 하는 일례를 말하면, 사람을 사망시키는데 CO₂는 CO의 약 18배, 그리고 CO는 시안화수소의 약 25배를 필요로 한다. 그런데, 시안화수소의 몇 배나 독성이 높은 유독가스가 있다고 가정해 보자.

오랜 세월 동안 연소독성에 관해서는 초유독가스를 찾은 것이 주된 연구테마가 되어 왔다. 초기에 어느 연구단체가 한번 흡입하는 것만으로 사망하는 연기를 발생하는 물질을 시험했다고 발표하였다. 그리고, 다른 단체는 그만큼 독성은 높지 않지만 잔혹한 사망방

식이 되는 연기를 내는 물질을 실험하였다. 이 경우, 다른 유독가스보다 특별한 강도의 신경성 유독가스를 발생하는 물질이었다. 이 유독가스를 흡입한 실험용 토끼는 죽기 전에 경련을 일으켰는데 그 모습을 비디오로 본 모든 사람들은 공포에 몸을 떨었다.

초기에 연소독성실험의 성공여부는 주로 초유독가스를 발견했는가로 판단되었다. 그러나, 진짜 초유독가스는 실험실에서도 좀처럼 할 수 없는 상당히 희귀한 것이라는 사실을 알았다. 초유독가스를 발생하는 소수의 물질 및 상품은 대부분이 시판되지 않고, 시판되는 것도 위험하기 때문에 회수되었다.

처음에 초유독가스를 발생한다고 생각되던 몇 가지 재료도 거듭 실험을 하면 그렇지 않다는 것이 확실해졌다. 그 좋은 예가 테프론이라는 상품명으로 알려져 있는 미국 듀폰사의 폴리테트라플루오르에틸렌(PTEE)이다. 초기의 실험에서 테프론의 연소에 의해 발생하는 연기 속에 상당히 고도의 독성가스(초유독가스)가 있는 것이 확인되었으나, 그후의 실험에서 테프론을 아무리 대량으로 연소하여도 연기 내부의 화학상호반응에 의해 초유독가스의 양은 미량이라는 것을 알았다.

따라서, 연소독성 연구에서는 유독가스보다도 질량 손실율과 에너지 방출율만이 아니라 물질의 내화도, 화염의 확대 등의 요소가 종종 보다 큰 문제로 취급되고 있다. 사실, NFPA(미국방화협회) 독성자문위원회가 1984년에 제출한 최초의 보고서에서는 많은 전문가들이 연기 독성에 관해 이 두 가지 율의 중요성을 강조하고 있다. 이 사실은 많은 사람들이 직감적으로 믿고 있는 사실과 정반대이다.

연소독성에 관해서는 소방관계자들조차 많은 사람들이 초보자로, 유독가스의 섭취량과 종류의 중요성을 비교하여 생각할 때, 초보자같은 판단을 해버리는 것이다. 시안화물 및 신경성 유독가스에 대해 전술했을 때 등줄기가 서늘한 독자가 있을 법한데, CO에서는 그렇게 생각하지 않았던 것은 아닌지, 만약 초유독가스가 화재독성의 주된 문제라고 하면, 초유독가스를 防除하는 것이 화재안전을 위한 중요한 열쇠라 생각되지만, 지금까지 20년간의 조사에서는 상황이 바뀌고 있다.

“NEPA JOURNAL” 1996년 11-12월호에서 발췌