

## 熱·煙氣 및 毒가스 放出率 測定에 關하여

柳 翼 權\*

### 서론

연료 하중이란 현재의 개념은 화재 위험의 적절한 평가 표준인가? 필자는 그렇게 생각하지 않는다.

그것은 연소력, 연기 방출과 독가스 방출을 재료들의 화재 위험이 정확히 평가되기 전에 여러 범위에 걸친 다양한 노출 조건에서 시험하여야만 한다.

여기에 기술된 연구의 목적은 빌딩 재료들과 가구 설비들이 가지고 있는 위험 요인들(다시 말하면, 어떤 화재의 경우에 있어서 인명 안전을 위태롭게 하는 그러한 특성들)을 실험적으로 측정하기 위한 기술과 방법들을 개선하는 데 있었다.

측정될 위험 요인들은 어떤 재료의 연소력(착화의 용이와 연소율), 연기 발생과 독가스 방출을 설명하는 것들이다. 당분간은 위험 요인들을 설명할 수 있는 가장 좋은 타입의 자료들은 열, 연기 독가스 방출율에 대한 자료들이라고 간단히 말할 수 있을 것이다. 그런 다음에 우리는 특수한 실험들을 사용하여 이 논문의 진실성을 증명해야만 하는 것이다.

### 문제에의 접근 방법

어떤 화재의 深度 혹은 바닥 면적 1ft<sup>2</sup>당 목재

\* 正會員, 韓國再保險公社·危險管理課長

이 논문은 오하이오 주립 대학 교수인 Edwin E. Smith 교수가 펜실베이니아주 필라델피아에서 제76차 N F P A의 연차 총회에서 제출한 것으로, "SMOKE"라는 책에 게재된 것을 번역한 것이다.

crib의 파운드 수로서 표현하는 연료 하중을 평가하는 데 익숙해진 사람들에게 어떤 화재의 경우를 분석하는 데 다른 하나의 접근 방법을 제안한다.

화재는 복합적이고 기동적인 반응이므로, 화재에 대한 합리적인 분석은 그 화재에 포함된 물질들의 속도 분석이나 또는 운동학적 분석을 필요로 한다. 이것은 위험 요인들에 대해서 시험한 샘플들이 방출물의 동역학에 영향을 주는 변수들로서 표현되어야만 한다는 것을 의미한다.

이 변수들은 보통 고려되는 화학적 성분과 무게 외에 위험 따위가 드러나 있는 표면적과 표면의 특성들을 포함한다. 어떤 샘플의 무게는 화재시에 방출되는 열과 연소의 산물들(또는 분해물)의 양을 결정한다. Rate(속도)과정은 어떤 물질이 지배받기 쉬운 주위 환경에 의해서 영향을 받거나 또는 노출 조건에 의해서 영향을 받는다. 그런고로, 기초적인 자료가 실험 결과로서 설명되어지기 전에 열과 연기와 독가스의 방출을 실험적으로 측정하기 위한 어떤 실험은 그 물질의 특성(표면적, 표면 구조, 무게)과 노출 조건(온도와 산소 농도)을 기술한 것을 포함하여야 한다.

이런 취지들을 염두에 두고서 그림 1에 도해가 된 장치가 설계되었다.

구조와 작동 방법의 상세한 설명은 지난번의 다른 논문에서 이미 주어졌다(맨 뒤의 참조란 참고). 원래, 그 장치는 샘플을 갖고 있고 주위가 둘러싸인 방에 남아 있는 열과 연기와 독가스의 농도를 측정함으로써 방출 속도를 결정할 수 있는 유동계이다. 수학적인 관계가 일반 방정식으로 주어진다.

$$(농도) \times (공기 흐름 속도) = 방출율(1)$$

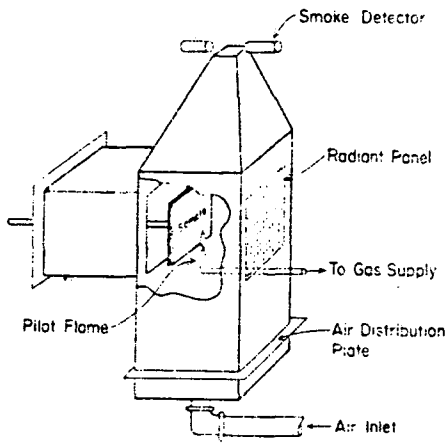


그림 1. Schematic of combustibility apparatus

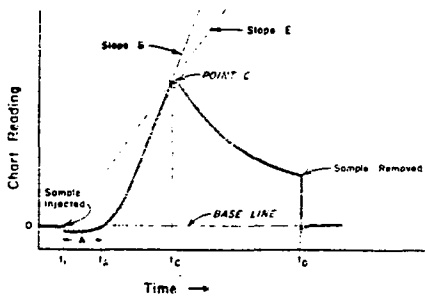


그림 2. Rate of heat release vs. time recording

열 방출율에 대하여

농도 =  $C_p(T - T_0)$ , 여기에서 T는 주위와 둘러싸인 방안의 샘플이 가진 출구 가스 온도이다( $T$ ).  $T_0$ 는 샘플을 주위와 둘러싸인 방에 넣기 전의 출구 가스 온도이다( $T_0$ ). 그리고  $C_p$ 는 출구 가스의 열 용량( $Btu lb^{-1} air$ )이다.

그런데 방출율은 그 장치 속으로 흐르는 공기 흐름에다 농도를 곱한 것과 같다. ( $lbs min^{-1}$ ). 방출 속도(율)는  $Btu min^{-1}$ 로 측정된다.

출구 가스 온도의 변화를 조절함으로써 열 방출 속도를 시간의 함수로서 결정할 수 있게 된다. 대표적인 열 방출율 대 시간의 기록이 그림 2에서 보여진다.

사용된 시험 조건들에서 샘플의 연소력이 이들 자료에서 결정될 수 있다.

점선 E와  $t_2 - t_1$ 는 가연성을 또는 밀접해 있는 조그만 불씨가 샘플에 얼마나 쉽게 붙어 붙는가를 나타낸다. 점선 B는 불씨가 밀접해 있는 점으로부터 불씨가 퍼지는 속도의 측정치이다. 점 C는 최고의 열 방출율을 나타내는 점이다.

시간  $t_2$ 에서 - 샘플이 연소하기 시작하는 시간 -  $t_1$ 까지 불씨가 발화점으로부터 샘플의 전 표면에 완전히 퍼질 때까지의 시간이다.

연기 방출율에 대하여

농도는 공기의 입방 ft당 연기의 입자수와 같다. 그러므로 방출율은 공기의 용적흐름에다 농도를 곱한 것과 같다. 방출율은 단위분당 입자수의 단위로 측정된다.

연기의 한 입자란 공기의 매 입방 ft당 한 입자의 농도가 1ft의 이런 공기속으로 빛의 전달을 10% 정도 감소시키는 그런 양으로 임의로 정의하였다. 잘 알려진 Beer's 법칙에 의하면, 광학상의 밀도 =  $-\log I/I_0 = kcl$ , 여기에서  $I/I_0$ 는 입사광에너지로 전도된 비율,  $k$ 는 비례 상수(입자당 0.0457ft<sup>2</sup>),  $c$ 는 농도(입방 ft당 입자수),  $l$ 은 빛의 진로의 길이임.

광전지를  $I/I_0$ 의 비율을 조절하기 위하여 출구 쪽 틀에 끼었으며, 광전지의 출력이 기록되었다.

이리하여 열과 연기 방출율이 계속적으로 시간의 함수로서 조절되었다.

독가스 방출에 대하여

농도는 공기의 매 입방 ft당 독가스의 무게이다. 그러므로 방출 속도는 용적 유동 속도에다 농도를 곱한 것과 같다(cfm). 방출 속도는 매분당 독가스의 무게의 수치로서 측정된다.

분광 광도계의 혹은 가스 천연색 사진의 분석들이 적용되는 경우에는 이용될 것이다. 염화수소는 출구 가스의 일정량이 그 속을 통과함으로써 거품이 일게되는 흡수용액의 적정에 의해서 분석되었다.

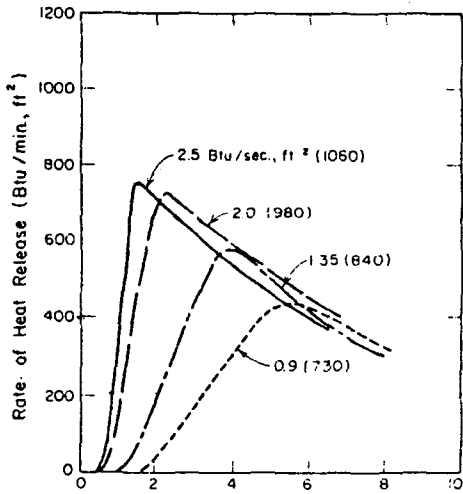


그림 3. Rate of heat release for particle board at different heat flux

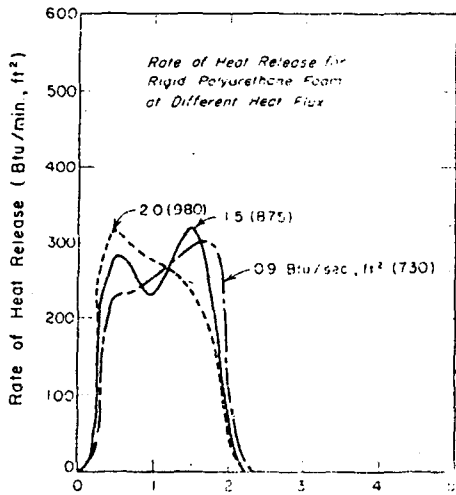


그림 4. Rate of heat release for rigid polyurethane foam at different heat flux

### 실험 결과

다양한 종류의 물질들이 일정한 범위의 노출 조건들에서 조사되어 왔다. 몇개의 도해들이 이런 물질들의 두세 개가 어떤 화재 속에 포함되어 있을 때 전개하는 그리고 비교가 되는 위험을 보여 주게 될 것이다.

우리는 또한 방출되는 양은 물론 방출속도 자료

들과 다른 노출 조건들에서의 방출속도 자료들을 아는 것이 대단히 중요하다는 이유를 보여 주려고 노력할 것이다.

먼저 후자(방출 속도)의 견해를 설명하기 위하여 그림 3과 4에서 일정한 범위의 노출 조건들에서 두개의 다른 물질들에 대한 열 방출 대 시간 곡선을 보여준다.

그림 3은 한 일상적인 섬유소로 된 재료의 성능을 나타낸다. 연소력 특성치들은 사용된 노출 조건의 범위(복사열 이동에 해당하는 흑체의 온도들이 등근 괄호 속에 주어진다)에서 균일하게 변화한다.

이제 이것과 그림 4에서 보여 주는 딱딱한 폴리우레탄 폼과 비교해 보자.

발화하기 시작하는 가장 낮은 노출 조건하에서도 딱딱한 우레탄 폼은 아주 높은 발화성을 가지고 있다는 점을 주의 하여야 한다.

실은에서는 그 물질은 연소를 도와 주지 않으며 중요한 열 방출도 관찰되지 않았다. 비교적 좁은 범위의 열 유동에서도 그것은 비가연성에서 고도의 가연성 물질로 변하여, 발화성과 열 방출율은 샘플에서 열흐름이 증가함에 따라 단지 조금씩 변한다.

노출 조건들에 대응하여 대단히 넓은 한 변화에서 다른 물질의 성능을 기초로 한 어떤 종류 물질의 성능을 정의하는 것은 분명히 현명하지 않다. 마찬가지로, 한 실험의 결과를 기초로 하여 어떤 물질의 성능을 평가 하는 것도 현명하지 않다.

서로 다른 노출 조건에서의 실험들에 대한 또 하나의 중요한 이유는 알맞은 조건들에서 물질들을 평가하는 것이다. 예를 들면 두 가지 종류의 의자 씌우개 계통이 그림 5와 6에서 비교가 된다. 각 경우에 피륙은 100퍼센트 나일론이었다.

구조 A에서 속을 매워 넣은 것은 우레탄 폼이었고, 이에 반해 구조 B에서는 면솜으로 속을 매워 넣었다.

$2.0 \text{ Btu s}^{-1} \text{ ft}^2 (970^\circ\text{F})$ 의 열이동에서는 그림 5에서 보여 주는 바와 같이 두구조에서 열방출율의 차이는 거의 없다. 그러나 실은에서(그림 6) 구조 A는 현저하게 보다 높은 열방출율을 가지다. 구조 A에서의 최고 열방출율은 구조 B의 최고 열방출

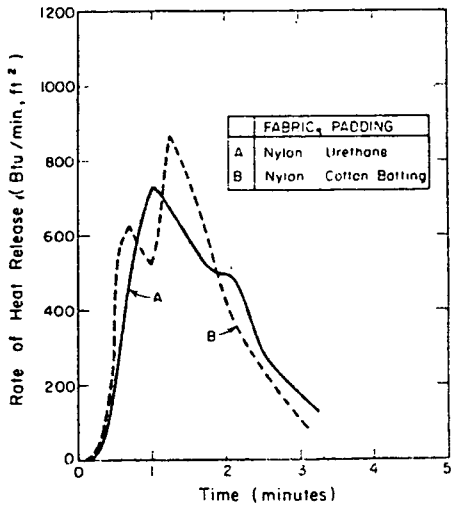


그림 5. Rate of heat release for upholstery systems at heat flux of 2.0 Btu s<sup>-1</sup>, ft<sup>2</sup>

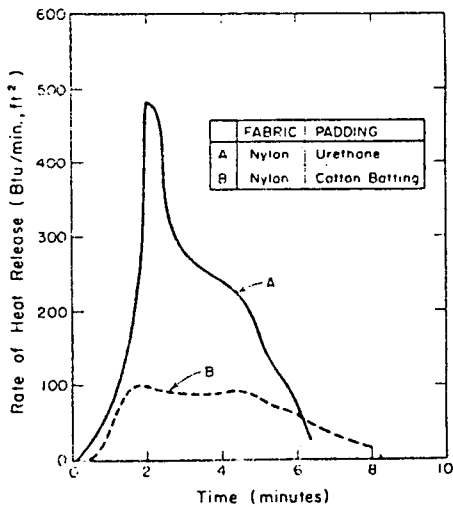


그림 6. Rate of heat release for upholstery systems at room temperature

율의 5배나 된다. 연기 방출에 있어서의 차이는 훨씬 더 현저하여, 구조 A는 낮은 온도조건에서 구조 B보다 10배나 더 큰 최고 연기 방출율을 가진다.

우리는 화재의 개시 단계 동안에 의자 씌우개의 성능에 보다 흥미가 있다. 그러므로 실온이 이런 구조들을 비교하는 데 보다 적절하다.

복도의 천정 Tile에 대해서, 우리는 전과 상태 동안 그 기능에 보다 흥미가 있을 것이며 그런 까닭에 이런 종류의 물질을 비교하는 데는 높은 온도 조건이 가장 적절할 것이다. 몇몇 샘플들의 연소력은 노출 조건에 따라 균일하게 변하지 않고 연소력과 방출 자료들이 그들의 용소나 위치에 알맞는 노출 조건에서 비교되어야만 하기 때문에, 화재시에 그들의 성능을 알맞게 비교할 일정한 범위의 조건하에서 물질들을 평가하여야만 한다.

### 위험 요인들의 평가

화재시에 노출된 어떤 재료가 발생하는 위험은 그 재료의 방출을 자료들에서 평가 될 수 있다. 양에 더하여 방출 속도가 중요하다. 왜냐하면 열과 연기와 독가스들이 배출되고 흡수되며 또는 달리 타오르는 건물이나 특수한 부분에서 제거되기 때문이다.

화재시에 얻어진 온도와 어떤 구획된 부분에도 달한 연기와 독가스의 농도는 방출율과 소산을 사이의 관계에 달려 있다. 예를 들면, 가스 레인지의 시험 불꽃에서 얻어진 주방의 온도 상승은 미소하다. 그러나, 만일 하루에 시험 불꽃에서 태워지는 가스의 같은 양이 1분 안에 태워진다면, 주방의 공기 온도는 약 500°F까지 올라 갈 것이다. 다시 말하면, 방출 속도와 양이 모두 농도를 계산하는데 고려되어야만 된다.

플라스틱 파이프에 대한 방출율 자료가 이런 물질들의 잠재 위험을 평가하는데 어떻게 응용될 수 있는가를 설명하기 위하여, 우리는 플라스틱 파이프에 대한 방출율 자료들을 이용할 것이다. 플라스틱 파이프에 대한 실험적 자료들이 그림 7, 8, 9에서 주어진다.

ABC 파이프에서 얻어진 주요한 위험은 그것의 가연성과 극도로 높은 연기 방출율이다. 그런데 PVC 또한 높은 연기 방출율을 가지며, 그것의 인명에 대한 주요한 위험은 독가스인 염화수소 가스를 방출하는 것이다.

염화수소 가스의 100에서 150ppm의 적은 양도 인간의 호흡을 의식할 수 있을 정도로 곤란하게

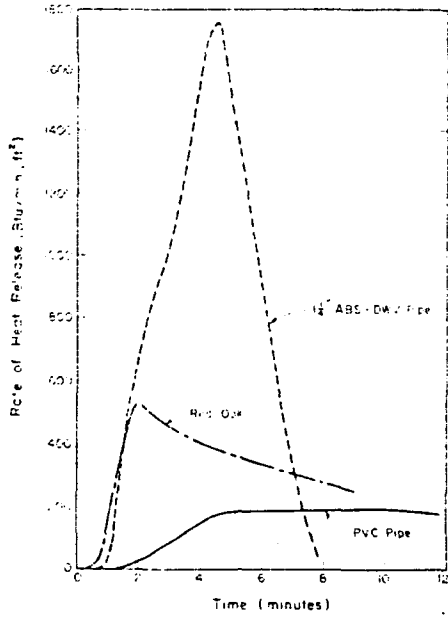


그림 7. Rate of heat release at  $2.6 \text{ Btu}^{-1}, \text{ft}^2$  for different materials

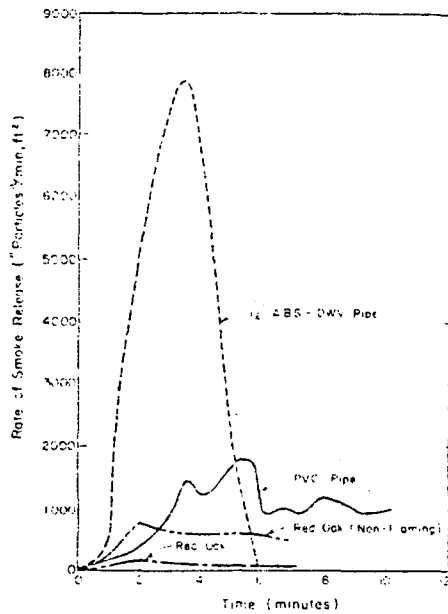


그림 8. Rate of smoke release at  $2.6 \text{ Ntu s}^{-1}, \text{ft}^2$  for different materials

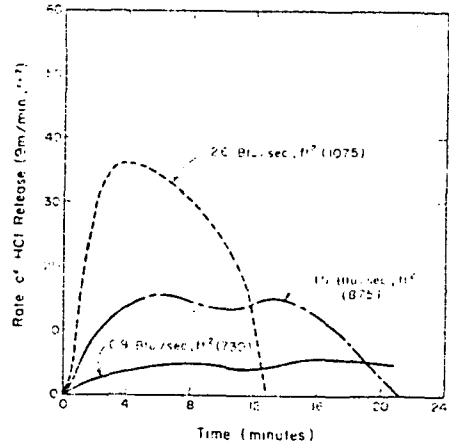


그림 9. Rate of HCl release for PVC pipe at different heat flux

할 수 있다.

가정적인 한 화재의 경우가 설명되고 그림 8과 9에 근거한 결론들이 화재의 경우에 전개될 수 있는 위험한 경우를 보여 주게 될 것이다.

가정적인 화재의 경우로서 30ft×50ft인 평면도와 이와 같은 크기의 지하실이 있는 교외의 농장식 주택을 생각하자. 화재는 지하실에서부터 시작한다. 그 지하실은 스케줄수 80이고 구경이 11/2 인치인 PVC 파이프를 노출된 길이 10ft의 수도관이 있고, 수직으로 8ft 길이에 직경이 6인치인 ABS-DWV의 배수관이 있다.

ABS 파이프에서 얻어지는 연기의 농도와 PVC 파이프에 의해 얻어지는 염화수소는 다음의 가정들 하에서 시간의 함수로서 계산될 것이다.

- 연기와 염화수소는 집안 구석구석에 균일하게 분포되어 있다( $21,000 \text{ft}^3$ ).
- 집안의 공기 중 20퍼센트( $4,200 \text{ft}^3$ )가 매분마다 배출된다.
- 염화수소의 반감기는 10분이고, 다시 말해서, 염화수소의 1/2이 10분 안에 흡수되거나 반응할 것이다.
- 화재가 발생된 4분후에는 화염이 파이프에 도달할 것이다.

그리고나서, 염화수소와 연기에 대한 방출을 자료들을 이용하여서, 그 주택안의 농도들이 그림 10과 11에 나타난 결과들로서 계산되었다. 화재가

발생된 5분 후에는 그 집안 전체의 염화수소의 평균 농도가 비록 짧은 기간 동안 노출되었어도 위험한 농도인 150ppm 이상이였다.

연기 농도들은 표준에 맞는 출구 표지가 구별될 수 있는 거리로서 정의되는 가시도와 관계가 있었다. 화재가 발생된 8분 후에는 연기가 너무 농후해서 2ft 떨어진 출구 표지가 보이지 않았다. ABS 파이프만으로 얻어진 연기로 인해서, 가시도는 5분 30초나 또는 화재가 그 파이프에 달한 후 1분 30초안에 8ft 이내로 떨어졌다.

8ft 길이의 ABS 파이프와 같은 연기 방출율을 연기 위해서는, 전체가 최고 속도로 타오르는 붉은 참나무가 600ft<sup>2</sup> 이상이 필요하게 될 것이다.

#### 연료 하중

방재 공학과 건축법에 있어서의 현저한 불일치는 건축물의 가구류와 비구조적인 설비에 대해서는 자유 방임적인 마음 가짐이 있는 것과는 대조적으로, 건축적인 구성 요소들에게는 비침이 없는 필요 조건들이 있다는 데 있다. 어떤 구획된 부분의 가구 설비들이 화재의 개시 용이성과 전파 속도를 결정하는 것들이라고 모든 사람들이 분명히 동의하는데 반해, 그 구획된 부분의 내장재를 일부 포함시키거나 또는 지나칠 정도로 억제함으로써 보다 안전한 건축구조를 설계하려고 피하는 사람은 거의 없다.

그러면, 어찌해서 연료하중의 전면적인 제한이 일반적으로 고려되지 않는가? “인간이사는 집은 그의 성이다”라는 것과 이러한 제한들이 인간의 자유들을 침해하기 때문인가? 또는 연료하중에 대한 일반적으로 인정할 만한 평가 기준이 없기 때문인가? 또는 인간이 자기 주위에 쌓아 두려는 분명히 어쩔 수 없는(불가항력적인) 가연성 물질들의 집중력 때문인가?

어느 누구도 가구 설비들에게 모든 가연성 재료들을 제거하려고 원하지도 않으며, 또한 그런 과감한 조치는 화재 안전에 있어서 매우 중요한 개선책들을 얻는데 필요하지도 않다는 것이다.

재료들을 가연성이거나 비가연성의 어느 하나로써 고려하고 연료 하중을 바닥면적 평방 ft당 가

연물의 증량 파운드수로서 나타낼 때, 가구 설비와 건축 재료들의 제한에 의한 화재 위험에서의 어떤 감소는 가망성이 없는 것처럼 보인다.

그러나 연소력(가연성)과 연기와 독가스 방출에 있어서의 큰 상이점은 가연성 재료들이라는데 존재한다. 연료 하중에 있어서의 조그만 변화(곧 정의 되는 바와 같이)로서 즉, 위험성이 큰 재료들을 제거한다든지, 혹은 대체시킨다든지, 그리고 비교적 적은 양을 사용함으로써 화재 위험에 있어 50 내지 75퍼센트의 감소 효과를 가져올 수 있었다.

이런 견해로 볼 때 여러 재료들의 제한으로서, 화재 안전에 관한 개선책이 그렇게 가망이 없는 것처럼 보이는 것은 아니다. 이러한 제한이 실시되기 전에, 어떤 재료의 위험 요인들의 상세한 평가가 있어야 하는 것이 바람직하다. 전에 언급한 바와 같이, 이것은 이러한 계획—이런 위험 요인들을 실험적으로 평가하기 위한 방법을 개발하는 것—의 기본적인 목적이다.

직업적인 안전과 보건에 관한 법령으로서 정부가 한 여러 조치 가운데, 공공 주택이나 여러 세대가 사는 집에 연료 하중의 제한을 제정하기 위한 많은 전례가 있다. 담배에 레테르를 붙여야 하는 법류를 생각해 볼 때, 가구, 양탄자와 다른 비품들에, 연기와 독가스가 나오는 것은 물론, 가연성이

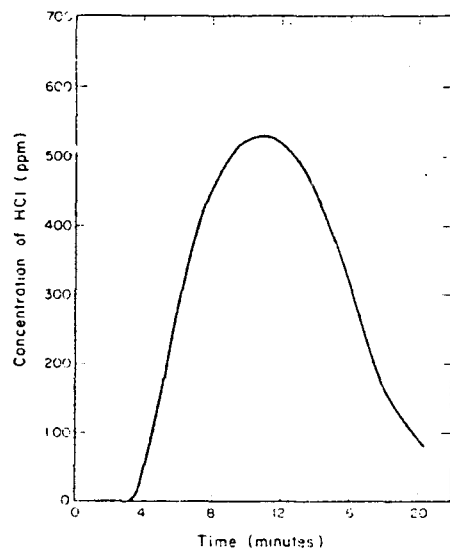


그림 10. Average concentration of HCl vs. time

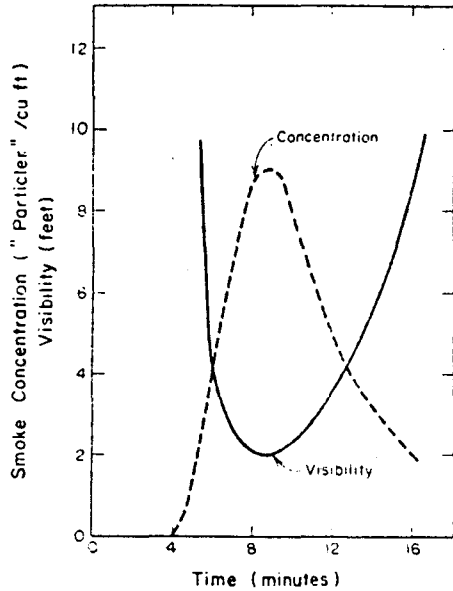


그림 11. Smoke concentration and visibility vs. time

라는 잠재 위험을 나타내는 레테르를 붙이지 말아야 하는 어떤 합법적인 이유가 있는 것처럼은 보이지 않는다.

우리는 식품에서 사이클로 메이트를 제거함으로써 인명을 구하는 것보다 가구 설비에서 극히 위험한 재료들을 제거함으로써 더 많은 인명을 구할 수 있을 것이다.

어쨌든 적어도, 가구 설비의 구매자들은 그 사고자 하는 물품의 화재 위험 등급을 비교할 수 있어야만 한다. 예로서 그림 5와 6에서 얻은 지식을 이용해서, 연기와 연소력 평가들이 이러한 재

료들로서 속과 커버를 씌운 안락의자에 대해서 측정될 수 있을 것이며, 이러한 평가들을 소비자들이 이용할 수 있을 것이다.

### 결론

위험 요인들-가연성, 연기 방출율과 독가스 방출율-을 실험적으로 평가하기 위한 기술과 순서들을 이제까지 기술하였다. 이들 위험 요인들에 있어서의 다양한 변화는, 크기에 있어서나 노출 조건에 대응해서나 모두 일반적으로 사용되는 재료들에서 발견되었다.

그런고로, 합리적인 화재 위험 평가가 시도되기 전에, 일정한 범위의 노출 조건에서 어떤 물질을 시험하는 것이 중요한 것이다.

단순히 가연성-비가연성이라는 평가는 연료 하중을 계산하는 데 충분하지 않다. 연료 하중이란 현재의 개념도 또한 화재 위험의 적절한 평가의 표준이 아니다. 연료하중을 한정하고 어떤화재의 경우에서 개시 단계와 전파 단계를 분석하기 위해서는 방출율에 관한 자료들을 사용해야 한다는 제안이 있다.

### 參 考 文 獻

\*Smith, E.E., "Heat Release Rate of Building Materials," Symposium on Ignition, Heat Release, and Non-Combustibility of Materials, ASTM STP 502, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, Pa., 1972.