

건물에서의 고온 연기 시험

본 보고서는 1999년 11월 24-27일 Belgium, Affligem(Essene)에서 화재 엔지니어 학회 벨기에 지부에 의해 개최된 Eurofire'99 심포지움에서 발표되었다.

건물 내 화재에서 발생하는 대부분의 인명피해는 연기에 의한 것이다. 그러므로 연기 제어가 방화기술에 있어서 중요한 요소가 되었다.

많은 사람들이 이용하는 몰이나 집회장과 같은 대규모 공간에서 연기와 열의 배출은 일반적으로 분석학적 용량 설계(analytical dimensioning schemes)나 수치학적 시뮬레이션(numerical simulation)을 이용하여 설계되며, 널리 사용하고 있는 모델들을 이러한 목적에 이용할 수 있다.

설치된 배출장치의 성능은 실제적인 연기시험에 의해서 가장 잘 평가될 수 있다. 이 때문에 중성 연기밀도시험(neutral density smoke tests)에서부터 약 몇 메가와트 열 방출율을 갖는 고온 연기 시험까지 다양한 기술들이 개발, 적용되고 있다.

본 고에서는 고온 연기시험(Hot Smoke Test)에 대한 조건들을 기술하고 있으며, 적용방법과 새로 개발된 시험방법으로 수행된 시험 결과가 발표되었다.

이 방법은 가스연료 열원, 트레이서 연기와 시험 중 건물 내 온도와 가스농도 측정에 의하며, 서로 다른 열 방출율을 갖는 고온 연기시험에서 시뮬레이션으로 결과의 대체가 가능하고, 시험의 결과는 수치학적인 시뮬레이션 예상 결과와 직접 비교할 수 있다.

따라서 고온 연기시험 수행 결과 몇 가지 결론을 얻을 수 있었다.

1. 건물에서 연기제어

연기는 기본적으로 일산화탄소에 의한 독성이 있을 수 있으며, 또한 불빛을 희미하게 하여 피난 시설의 시계를 감소시켜 대피활동에 장애를 준다. 그리고 연기는 연기 자체가 함유한 열과 점화될 수 있는 불완전 연소물에서 발생된 가연성 물질에 의해 화재의 확산을 유발할 수도 있다.

건물 내 연기제어의 기본적인 목적은 아래와 같다.

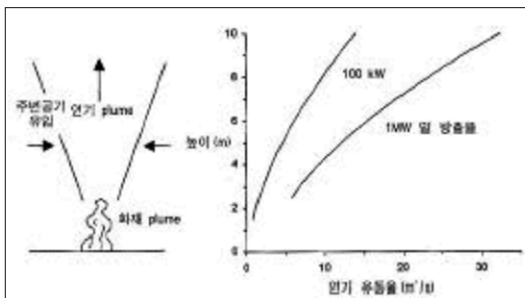
- 제한된 시간동안 건물에서 완전한 대피가 가능하도록 독성 연기의 장애를 받지 않는 피난수단의 유지
- 구조·구급 및 소화활동 중 소방대원에게 도움이 되는 청정 공기층의 유지
- 연기 이동과 화재확산 제어
- 건축재료와 내부 인테리어의 피해방지

연기의 확산을 제한하고, 연기 이동을 제어하기 위하여 연기감지기, 방연벽, 연기 배출 및 연기제어시스템을 포함한 다양한 방법들이 이러한 목적

에 사용되며 때로는 상호 결합되어 연동으로 사용하기도 한다.

대부분의 경우, 연기제어시스템은 반자 아래 부분에 부양성 연기층을 형성하고 나머지 아래 부분에 청정 공기층을 형성하는 것을 기본 원리로 하고 있다.

대형 공간 내에서 연소하는 화재의 경우, 그림 1에서 표시된 것 같이 화재 plume 즉, 화염구역과 화원 상부 연기 plume 사이를 구분하는 것이 유리하다. 연기 plume으로의 공기 유입은 화원과과의 거리에 직접적으로 영향을 받고 어느 정도는 열 방출율에 따라 좌우된다. 연기 plume 내의 유량 유동율은 일반적으로 수직거리 Z ($Z^{5/3}$)과 열 방출율 $Q^{1/3}$ 에 따라 변화한다.



【그림 1】 화원 상부 부양성 plume 공기 유입

연기제어 설계는 장소와 시간에 따른 열방출율에 관련된 1개 또는 그 이상의 설계화재 정의가 필요하다. 이러한 자료에 의해 연기량과 유량 흐름율은 적절한 plume 모델로 평가될 수 있다.

연기는 건물에서 자연 배기구나 기계적 설비로 배출시킬 수 있다. 자연 배기구인 경우 배출력 (drive force)은 연기의 부력이거나 정확히 표현하면, 고온의 연기와 주변 공기사이의 밀도 차에 의해서 발생하는 압력 증감에 의한다. 기계식 배출인 경우에는 환은 미리 정해진 유량 유동율로 공기와 연기를 배출시키며, 연기층 하부에 청정 공기층이 유지되도록 실 하부면에 충분히 조성된 급기 공기가 필요하다.

연기제어시스템 설계는 다양한 방법과 도구가 지원되어야 한다.

- 분석적 용량 계획(analytical demensioning schemes)[e.g EN 12101]
- 물리적 모델(소규모 건물 모델)
- 컴퓨터 화재 모델
 - 존 모델
 - 필드 모델(CFD 모델 등)

화재 엔지니어는 그 자신의 선택에 따라 입증된 모델과 방법들을 이용할 수 있다.

만일 특수용도의 건물이나 특이한 건축설계 방법이 적용되는 경우와 같이 표준화된 접근방법을 적용할 수 없는 경우, 화재 엔지니어는 연기제어시스템의 목적 및 요구되는 성능에 대해서 더욱 상세한 기술을 하여야 할 것이다.

2. 연기제어시스템의 실제적인 시험

인명과 재산의 안전을 위한 연기제어시스템의 중요성 때문에 시스템에 대한 시험이 시스템의 기능을 유지하기 위해서 필요하다. 이들 시험들은 보통 구성하고 있는 시스템 시험, 인증시험 및 정기시험으로 구분 할 수 있으며, 설치된 시스템이 규정된 설계와 일치하고 적절히 작동되고 있는가를 확인할 수 있도록 수행되어야 한다.

이 같은 시험과정에서 제거해야 할 시스템의 오작동이나 오류 등이 드러날 것이다.

상기에서 언급된 시험은 종종 연기감지기에 의한 신호전달과정에서부터 연기 배출관의 유량 유동율까지 기술적인 시스템 특성에 초점이 맞추어지게 되므로, 연기확산 방지와 청정지역 유지라는 관점에서 채택되는 연기제어시스템의 유용성에 대한 평가를 완수하는 것은 대단히 어려운 문제이다. 이러한 이유 때문에 건물 내에서 다양한 종류의 인공적인 연기를 이용한 실험(full scale test)들이 제시되고 수행되어 왔다.

중성밀도연기(neutral-density smoke: 저온연기)에 의한 시험은 건물 내 공기이동이나 방연벽의 유용성에 대한 설명이 될 수 있다. 고층건물에서 이 같은 시험으로 바람이나 연돌효과에 기인한 자연배기 성능에 대한 개념이 전달될 수도 있을 것이다. 부양성 부족 때문에 연기층과 하부의 청정 공기층의 형성을 기본원리로 구성되는 연기제어시스템을 이 방법에 의해 평가한다는 것은 불가능하고 또한 연기의 초기 분출 기류의 공기 유입율과 연기 유동율의 양을 설명한다는 것도 불가능하다.

연기층은 연기자체의 부력에 의해 반자 아래에서 연기가 형성되고 확산되기 때문에 뜨거운 연기나 따뜻한 연기를 이용한 시험이 연기유동 특성의 관점에서 보면 더욱 실제적이다. 예를 들면 건물의 형상, 누설, 기계적 공기의 흐름 또는 장애물 영향 등에 관련된 많은 단순화된 가설이 연기제어시스템 설계 단계에서 설정되어야 한다. 고온 연기시험에서 관찰되는 연기흐름은 이 같은 가설을 분명하게 밝혀 낼 수 있을 것이다.

실제화재에서 열과 연기는 순간적으로 방출되고 시각적으로 인지되는 부양성 plume처럼 드러난다. 고온 연기시험에서는 보통 시각적으로 인지되는 에어러졸(트레이서 연기)이 투명한 부양성 plume에 첨가되어 트레이서(추적용 연기)와 plume이 혼합되어야 한다. 부양성 가스의 이동과 확산이 트레이서에 의해 보여지게 된다. 트레이서의 방출율이 정해지지 않았으므로 고온 연기시험 중 관찰된 농도와 광학적 밀도를 실제화재연기의 특성들로 착각해서는 안된다.

실제 화재연기에 포함된 그을음 입자들과 독성 가스 이외의 시각적으로 인지 가능한 트레이서 입자는 시험연기가 충분히 희석되면 완전히 사라질 수도 있다. 그러므로 시각적 관찰에 의해서만 실시된 고온 연기시험의 연기층 경계면의 측정값은 정확하지 않을 수도 있다.

연기제어시스템에 대한 가장 신뢰할 수 있는 시

험은 실제 화재조건일 것이며, 그 이외의 실제적 시험은 오직 제한된 값을 갖게 된다는 논쟁이 종종 일어나곤 한다. 그러나 비록 실제화재시 일지라도 연기제어시스템에 사용된 설계화재 보다 아주 낮은 열 방출율과 연기 생성율을 갖는 덜 위험한 상황이 발생할 수도 있다.

그러므로 실제적인 연기시험에 관련된 문제점은 아래와 같다.

- 시험연기의 유동특성이 설계화재에서 예상된 연기유동 특성에 만족할 만큼 유사한가?
- 연기층 경계면을 자신있게 확정 지을수 있는가?
- 설계화재에 시험결과와 보삽법(자료의 추정)이 가능한가?

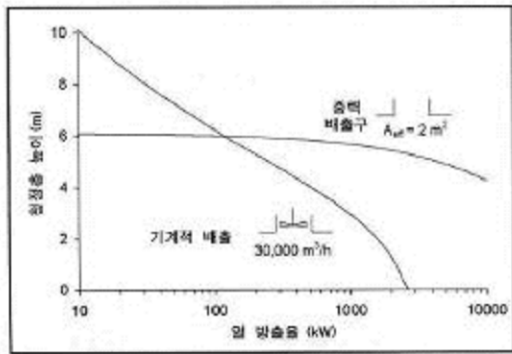
그림 2의 매우 단순한 상황에서 설명된 것처럼 연기 배출방법에 따라서 열 방출율은 연기층 경계면(청결층 높이)에서 서로 다른 결과를 가질 것이다.

자연 배기구와 공기 흡입구의 고정된 유효 단면적이 적용되는 경우 안정된 연기층 경계면은 열 방출율 증가에 따라 서서히 변화하게 되나 이것과 대조적으로 일정한 배출율을 갖는 기계식 배출에서는 열 방출율에 크게 의존하는 안정된 연기층 경계면이 발생된다. 고온 연기시험 결과에 근거한 연기제어시스템의 성능을 평가할 때는 이 같은 사실이 고려되어야 한다.

극한 기후조건은 고온연기시험의 실시를 연기해야 하는 이유가 될 수 있다: 바람에 의한 정체 압력이 연기층의 밀도 차에 의해 발생하는 압력을 초과하는 높은 풍속에서는 자연 배기구의 연기배출 성능평가는 불가능하게 된다. 주위온도가 건물 내 초기 실온보다 훨씬 높은 경우 연기배출이 시작되면 연기 단층현상(stratification)이 발생되는 경향이 있다. 이러한 한계조건들은 부양성 plume에서 온도상승이 되어 연기시험에 영향을 줄 수가 있다.

고온 연기 시험을 위한 요구조건은,

- 시험 연기는 인지된 plume 특성을 갖는 부양성 가스를 이용하여 방출
- 시험 연기는 눈으로 식별 가능
- 유동특성은 실제화재 연기특성 유사
- 연기층 경계면 측정에는 객관적 기준 적용



【그림2】 기계식 연기배출 및 자연배출 : 아트리움 (천정높이= 14 m)에서 안정된 연기층 경계면 열 방출결과 모델예측

3. 새로운 고온 연기시험 절차의 적용과 결과

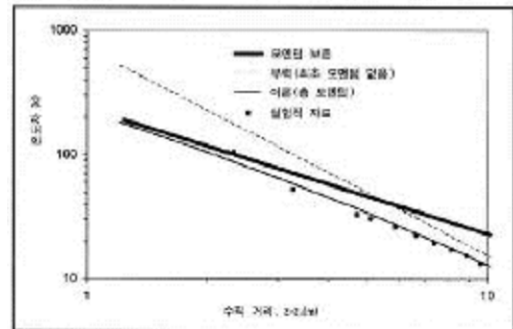
상기에서 언급된 고려할 사항에 근거하여, 아래의 기준들을 수행할 수 있는 고온연기시험 절차가 개발되고 있다.

- 비상차단장치(shut-down option)로 열방출율이 조정될 수 있어야 한다.
- 고온가스의 최고온도는 벽마감재나 내부 시설물 등이 손상을 입지 않는 안전한 온도 범위이어야 한다; 자동식 스프링클러설비의 작동을 확실하게 피할 수 있도록 하여야 한다.
- 고온가스와 트레이서는 위해하지 않고 잔류물이나 부식이 발생하지 않아야 한다.

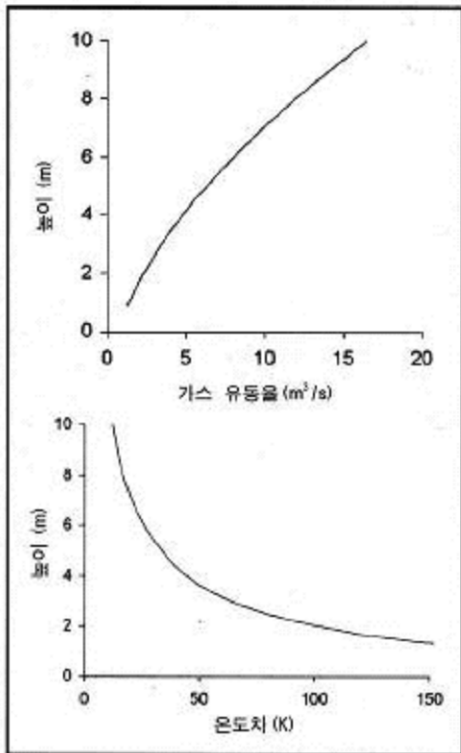
- 시험장치는 쉽게 설치할 수 있고 조작될 수 있어야 한다.

최대 열 방출율이 150KW이며, 차가운 공기 유동율이 1.2m/s의 성능을 가진 웬 타입 프로판가스 버너가 열원으로 선정되었다. 고온공기의 유동과 연기층 형성이 나타날 수 있도록 버너 수직 방출구 상부에 여러 가지 계측기와 트레이서 연기가 추가된다. 트레이서 연기는 액체의 증발에 의해 방출되는 미세한 액체 에어리졸이다. 혼합이러는 측면에서 보면, 트레이서 연기의 유량 유동율과 열 방출율은 고온공기 plume의 각각의 값에 비교하면 작은 양이다. 시험 중 연기층 경계면의 위치를 결정하기 위해 다양한 위치에서 가스온도와 이산화탄소 농도의 연속적인 측정과 기록이 이용된다.

열원의 plume특성은 시험실 조건에서 시험연기 plume의 높이에 따른 유동율과 온도를 설명한(그림 3, 4) 자유교란분사 이론에 근거하여 유도된 공식에 의해 측정되었다.



【그림3】 버너 plume 특성(150KW 가스 버너) : 측정치 대 예견된 온도차



【그림4】 고온 연기시험에 사용된 150KW 가스 버너의 plume 특성

동일한 열 방출율 조건에서 실제화재와 비교하면 시험연기 발생장치의 plume 유동율은 더 높고, plume 온도는 더 낮다. 여러 대의 시험연기 발생 장치의 순간적인 작동으로 유동율을 온도변화 없이 증가시킬 수 있다. 장치간의 수평거리는 연기 plume 사이에 상호작용이 발생되지 않도록 충분히 이격시켜야 하며 이렇게 하면 공기유입(air entrainment)을 줄이는 결과가 될 수 있다.

표 1은 권장하는 높이 "Z"에서 시험이 시작한 것과 같은 plume 유량 유동율을 일 수 있는 실제화재의 대략적인 열 방출율을 제시한다.

시험장치는 여러 대의 연기발생장치, 2개의 독립된 자료인식 및 기록장치들, 온도측정용 배열장치에 배치되는 40개까지의 온도 탐침과 그리고

이산화탄소 농도측정용 배열장치(array)로 구성되며 이것들의 설치시간은 보통 3시간 이내가 소요된다.

안정된 열 방출율을 갖는 한번의 고온 연기시험은 20분에서 60분 정도 소요될 것이다. 각 시험에 대해서 비디오 촬영과 사진을 찍고 주변조건(온도, 풍향 및 풍속)을 기재한다.

【표1】 연기층 내 유량 유동율과 상응되는 화재 열 방출율 [Zukoski(ZUKO 95)에 의해 제시된 far-field entrainment 보정계수로 계산]

연기발생 장치 수	1	2	4
시험연기열방출율(KW)	150	300	600
화재열방출율(KW) Z=6m	230	1,800	14,600
Z=10m	165	1,300	10,500

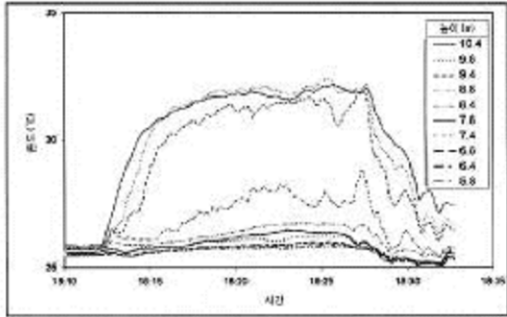
그림 5는 대규모 건물에서 고온 연기시험 중 온도측정 배열장치의 전형적인 기록치를 표시하고 있다.

예를 들면 그림 6의 18:20에서 측정된 수직온도와 이산화탄소 농도값은 연기층 경계면을 8-9m 사이로 정할 수 있다는 것을 표시한다.

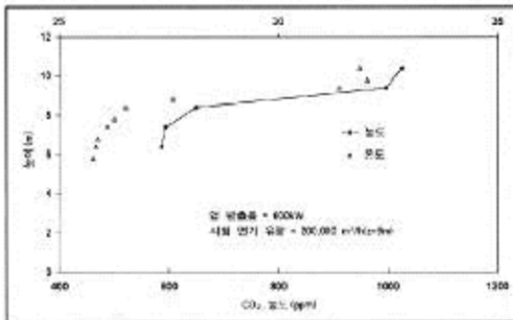
시험의 열원은 프로판 가스를 사용하며, 연소과정에서 공기와 혼합하였을 때 1K 온도상승 당 42 ppm 농도에 상응하는 일정한 비율로 대류열(convective heat)과 이산화탄소를 방출시킨다. 이산화탄소가 완전히 가스상태로 남아있는 동안은 연기가 확산되는 과정에서 열의 일부가 벽과 천장으로 전달될 것이다. 낮은 가스온도와 개방된 화염이 없으면 복사열 손실은 무시될 수 있다.

만일 존 모델이나 필드 모델을 이용한 컴퓨터 시뮬레이션이 연기제어시스템에 사용된다면 이 시험 연기원의 plume 특성을 이용하여 별도의 시뮬레이션이 수행되어야 한다. 고온 연기시험 결과

와 시뮬레이션의 만족스러운 일치는 전반적인 검증이 이루어진 것으로 간주될 수 있다.



【그림5】 넓은 건물 내에서 고온 연기 시험 [천장 높이 ~ 12m, 바닥면적 16,000㎡, 온도 : 시간]



【그림6】 넓은 건물 내 고온 연기시험 [천장 높이 ~ 12m, 바닥면적 16,000㎡, 온도 : 농도 (시간 = 18:20h)]

모델 예견과 시험결과의 현저한 불일치는 다음 조건이든지 더욱 더 세밀한 시험이 요구될 것이다.

- 연기운영시스템은 설계에 따라 실행
- 시뮬레이션의 가정과 단순화의 근거의 확실성
- 모델의 적용이 그 빌딩에 적합함

4. 고온 연기시험에서 경험 사항

잘 설계된 고온 연기시험은 연기 운영 시스템의 정량적 평가를 가능하게 한다. 성능 요구사항은 법적 규정이나 화재안전 원리에 의해 결정되어야 하지만, 본 시험은 시스템이 설계에 따라 운영되는지 여부만을 나타낸다는 것을 분명히 하여야 한다. 고온 연기시험의 목적은 미리 합의되어야 한다. 특히 고온 연기시험 중 시각적으로 인지되는 연기 확산이 반드시 최악의 상태를 의미하는 것은 아니지만, 설계화재조건에서 정률적 증가를 연기 제어 시스템의 유용성을 평가한다는 것을 명백하게 설명할 필요가 있다.

이제까지 설명된 새로운 연기시험 절차는 컨벤션 홀, 사무실 건물, 전시장 등 다양한 건물에서 성공적으로 적용되고 있으며, 이들 결과들은 연기 제어 시스템 성능 평가를 위한 확실한 자료로 제시되고 있다.

대부분의 경우 연기 제어 시스템의 부적절한 작동은 여러 구성부품의 연동과 관련된 오류의 결과일 수 있다. 한번의 보조 시스템의 시험으로 이 오류들을 밝혀낼 수는 없다. 그러므로 건물의 대리인과 함께 고온 연기시험을 실시하기 전에 유사한 예비시험을 실시하는 것도 바람직하다.

과학적 표준에 의해 수행되는 고온 연기시험은 연기 제어 시스템 대한 확산을 증진시키는데 도움이 된다. 만일 이들 시험 절차에 대한 일련의 기본 요구사항이 받아들일 수 있다면 연기 제어 시스템의 실용성을 증대시키고, 그들의 유용성에 대한 어떠한 논쟁도 불식시키기 위해서 이 시험이 도움이 될 수 있을 것이다. ☺

— Fire Engineers Journal (2000. 3)

— 발췌: 위험관리센터 과장 신병철