

소방기술사 정규반 제 4 강의

: 제 1 장 연소기구 및 소방 ◦ 방화대책

소방기술사 박 성 수, 신 부 환 著

- 문제1) Fool-Proof, Fail-safe
- 문제2) 화재 플럼
- 문제3) 연기의 단층화
- 문제4) Plug-holing현상
- 문제5) 목재의 발화
- 문제6) 연기발생의 Mechanism
- 문제7) 연기의 농도표시
- 문제8) 연기의 피난한계농도
- 문제9) 연소 시 유해가스
- 문제10) 화재가 인체에 미치는 영향(손상)
- 문제11) 연기발생의 정량적 평가

문제1) Fool-proof, Fail-safe

1. 개요

- ① 방재시스템의 목적인 안전을 달성하기 위해서는 구성하는 Subsystem(하부조직)이 상호기능을 분담하고 역할을 보완하면서 설계·시공·유지·사용되는 것이 바람직하다
- ② 인간-기계시스템에서 설계대로 기능을 발휘하기 위해서는 인간의 요소가 크게 관계되는데 Fool-proof와 Fail-safe이다

2. Fool-proof

(1) 개념

- ① 시스템의 이상 또는 비상사태에 대해 인간이 혼란 없이 쉽게 대응할 수 있도록 단순하고 명쾌한 배려를 한 대책
- ② 기술적으로는 비록 초보자가 만진다 하더라도 안전이 확보되어 실패가 일어나지 않도록 설계해 두는 것

(2) 실제응용의 예

- ① 문자보다 색 또는 기호를 사용한다
- ② 소화설비·경보설비의 위치, 유도표지 : 쉽게 판별할 수 있는 색채를 사용한다
- ③ 피난방향으로 문을 열 수 있게 해둔다
- ④ 도어노브는 회전식이 아니라 레버식으로 한다
- ⑤ 정전시에도 피난구를 알 수 있도록 외부광이 유입되는 위치에 문을 설치한다

3. Fail-safe

(1) 개념

- ① 화재발생에 의해 시스템의 일부가 고장 나거나, 그 결과 건물의 일부가 불이나 연기에 오염된 상태가 되더라도 일정한 안전성이 보증되는 것
- ② 결국 재해의 발생이 곧바로 중대한 사고나 위험에 직결되지 않도록 설계하는 것
- ③ 기계가 고장났을 경우, 그대로 폭주해서 재해와 연결되는 일이 없도록 안전을 확보 하는 시스템

(2) 실제응용의 예

- ① 부분화 : 방화구획, 방연구획
- ② 다중화 : 2방향 피난, 비상전원, 수계시스템의 고가수조방식의 수원, 자탐설비의 Loop 배선방식, 수계시스템의 Loop 배관 및 Grid 배관

※ 기출문제분석18(신뢰도확보관련)

1. 화재안전계획의 기본적인 개념인 Fail-Safe와 Fool-Proof에 대하여 설명하시오(48회,20점)
2. Fail-Safe와 Fool-Proof의 개요와 예를 설명하시오(53회,20점)

문제2) 화재플럼(Fire Plume)

1. 정의

(1) Fire Plume

: 부력에 의해 발생하는 화염기둥이며, 고온의 연소 생성물이 위로 상승하고 것이다

(2) 부력(Buoyant Force)

- ① 부력은 밀도차 때문에 생기는 유체내의 상승하는 힘이다
- ② 밀도는 가스온도에 반비례하므로 가스온도가 공기의 화재플럼 온도보다 높은 경우는 뜨거운 연소가스에 상향력이 생겨 상승기류를 형성한다
- ③ 더운 플럼 가스가 국부적으로 공기온도를 냉각시키면 부력은 0이 되고 플럼의 상승이 정지된다

2. 생성 Mechanism

(1) 상승기류의 형성

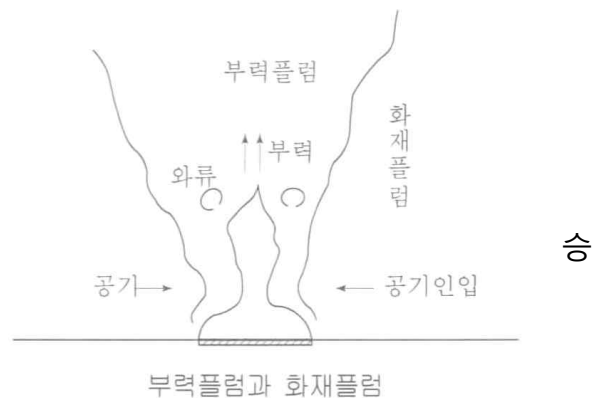
: 화재로 인하여 고온의 가스가 생성되어 밀도차에 의한 부력으로 상승기류를 형성

(2) 인입(Entrainment)

: 더운 플럼 온도가 속도를 상승함에 따라 주위의 찬 공기가 화재 플럼 내로 유입 (베르누이의 효과)

(3) 공기 혼합

- ① 화재 플럼은 인입되는 공기에 의해 상향과 함께 희석되어 온도가 저하되는 한편 유량은 증대
- ② 이렇게 생기는 상승기류의 연소가스와 주변 공기 등의 혼합기체가 초기화재 단계에서의 연기가 된다



(4) 와류 발생

- ① 부력이 플럼유체를 상승시키고 이의 차가운 끝부분이 천천히 아래로 내려오게 된다. 이것이 와류(Eddies)를 초래하게 되며
- ② 와류들은 회전하기도 하고 플럼의 끝을 따라 상승하기도 하는데 이러한 와류는 공기 인입에 영향을 미친다

(5) 난류 효과

- ① 와류에 의한 난류 효과로 난류확산화염을 형성하게 된다
- ② 즉, 부력화염에 존재하는 커다란 와류에 의한 난류효과는 연소되는 플럼내의 화염 높이에 심대한 영향을 미친다

3. 자연 화재 플럼의 구조(McCaffrey의 화재 플럼)

(1) 연속화염영역

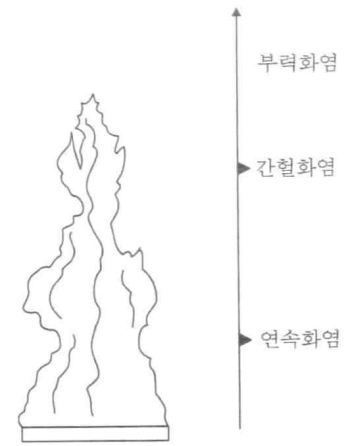
- ① 연료표면 바로 위의 영역
- ② 지속적인 화염 존재
- ③ 연소가스의 흐름을 가속 시킨다

(2) 간헐화염영역

- ① 간헐적으로 화염이 존재, 소멸되는 영역
- ② 연소면의 크기에 반비례하는 주기를 가지고, 이러한 진동이 난류성을 증대 시킨다
- ③ 와류발산주기 = $1.5/\sqrt{D}$ (D : 화염의 하부 직경)

(3) 부력영역

- ① 화염상부의 대류 열기류 영역
- ② 높이에 따라 유속과 온도가 감소되는 특징
- ③ 화재감지기, 스프링클러 등의 설계에 있어 중요한 부분



(a) 화재플럼의 구조도

4. 플럼 내에서의 현상 분석

(1) 화염 영역

- ① 화염은 연료 층에서 가까운 곳인 연속화염영역과 연료층에서 먼 간헐화염 영역이 존재하며 서로 연결된 형태
- ② 화염의 높이

$$L_f = 0.23Q^{\frac{2}{5}} - 1.02D$$

여기서, L_f : 화염의 높이

Q : 에너지 방출속도 [kw]

D : 연소면의 직경 [m]

③ 화염의 온도

- ㉠ 연속화염영역 : 높이에 따라 온도가 상승, 상부는 800[°C] 정도로 일정
- ㉡ 간헐화염영역 : 높이에 따라 온도가 저하, 경계지점은 320[°C] 까지 저하됨

(2) 부력 영역

- ① 상승되는 대류 열류의 기둥으로 그 구조는 주위의 유체와의 상호작용에 의해 결정된다
- ② 연소 가스는 밀도차에 의한 부력으로 상승되며, 단위부피당 부력은 유체 내부의 점성력의 저항을 받는다
- ③ Grashof 수 로 표시할 수 있다

5. 화재 플럼과 구획경계와의 상호작용

(1) 방해 플럼(Confined Plume)

- ① 화원이 벽 쪽이나 모서리에 있다면, 주변 공기의 인입이 상당히 제한된다. 따라서 부력영역의 온도저하가 훨씬 적어진다
- ② 연료 휘발분을 연소시키기 위해 충분한 공기를 유입하려 화염의 길이가 상당히 길어진다

- ③ 이러한 효과는 상향 화염확산을 증대시켜 주위 가연물의 수직표면으로의 연소 확대를 촉진 시킨다

(2) 천장제트흐름(Ceiling Jet Flow)

- ① 수직범위의 화재 플럼이 천장에 의해 제한을 받게 되면, 더운 가스들이 수평의 천장면을 따라 굴절되어 수평으로 흐르게 된다
- ② 이러한 흐름을 Ceiling Jet Flow라 하며, 이는 고온의 연소생성물이 부력에 의해 천장면 아래에 얇은 층을 형성하는 비교적 빠른 속도의 가스흐름이다
- ③ Ceiling Jet Flow의 두께는 실 높이의 5~12[%] 정도이며, 최고온도와 속도는 실 높이의 1[%] 이내 범위에서 발생된다
- ④ NFSC의 스프링클러 헤드의 설치를 천장 면에서 30[cm] 이내로 정하는 이유는 보통 실의 높이를 3[m]로 보아 Ceiling Jet Flow의 범위 내에 헤드를 위치시키기 위함 이라 할 수 있다
- ⑤ 천장과 벽 부분 사이에서는 Dead Air Space가 발생되므로, 벽에서 헤드를 10[cm] 이상 이격시키도록 한다(연기 : 10cm, 열 : 60cm)

(3) 수평 화염(Horizontal Flame)

- ① 천장이 매우 낮거나, 화재가 충분히 커서 화염이 천장에 닿아 화염이 Ceiling Jet Flow처럼 수평으로 굴절되는 것
- ② 공기인입속도가 현저히 저하되어 길이가 상당히 연장되어 Flash Over 발생을 촉진시킬 수 있다
- ③ 공기인입속도가 저하되는 이유는 고온가스가 찬 공기 위에 위치되는 비교적 안정된 흐름이 되어 차이가 오히려 공기인입을 방해하기 때문이다

문제3) 연기의 단층화(Stratification)

1. 정의

- ① 연기 층이 하부에 층화되어 천장에 도달하지 못하는 현상을 연기의 단층화라 하며, 플럼의 온도가 주변의 공기 온도와 같게 될 때 상승력이 발생하지 않기 때문이다
- ② 천장 부근의 공기층 온도가 상승하는 연기의 온도보다 높은 경우, 천장에 설치된 소방시설의 작동지연이 발생할 수 있다

2. 발생 메카니즘

- (1) 훈소성 화재나 대 공간 화재의 경우
- (2) 천장부근 온도가 높거나, 천장이 높아 연기 층의 온도가 저하된다
- (3) 연기 층의 온도는 상승에 따라 점차 저하된다(공기의 유입 등)
- (4) 천장부근의 공기층 온도보다 냉각된 연기 층의 온도가 높지 않아 연기 층이 공기층 하부에 층을 이루게 된다
- (5) 발생원인
 - ① 저장도 화재의 경우 : 훈소성 화재 등으로 플럼의 온도가 낮은 경우
 - ② 층고가 높은 대공간의 화재 : 아트리움, 대공간 체육관 등
 - ③ Smoke Logging 현상 : 스프링클러의 방수로 연기층이 냉각되어 부력을 상실하여 아래로 하강하는 현상
 - ④ 천장부에 고온이 형성될 때 : 태양열 등 외부광의 영향
- (6) 단층현상의 발생여부 확인(온도분포별 추정방법)
 - ① 불연속 온도분포 : 플럼의 온도를 산출하여 상부공기층의 온도보다 낮아지는 지점을 확인한다
 - ② 연속적인 온도분포 : 플럼의 최대상승높이 계산식으로부터, 아트리움 천장까지 연기를 도달시킬 수 있는 최소 화재 크기를 검토한다

3. 문제점

- ① 감지기, 스프링클러 헤드의 감열시간이 지연된다
- ② 조기 감지 및 소화가 어려워져 소화실패 확률이 높아진다
- ③ 화재의 확대가 우려된다
- ④ 연기의 경계층 하강에 의한 가시도 저하로 피난에 어려움이 발생한다

4. 대책

- (1) 감지기 선정
 - ① 천장 부착형 감지기 이외에 광전식 분리형 감지기를 설치
 - ② 광전식 분리형 감지기가 작동되면, 천장의 따뜻한 공기층을 배출하도록 제연설비를 설치
- (2) 스프링클러 선정

- ① 감지기 작동과 연동하는 개방형 헤드 설치
- ② RTI가 낮은 스프링클러 헤드 선정
- (3) 천장에 열을 배출하는 배출설비 설치
- (4) 제연경계의 세분화 등

문제4) Plug-holing현상

1. 정의

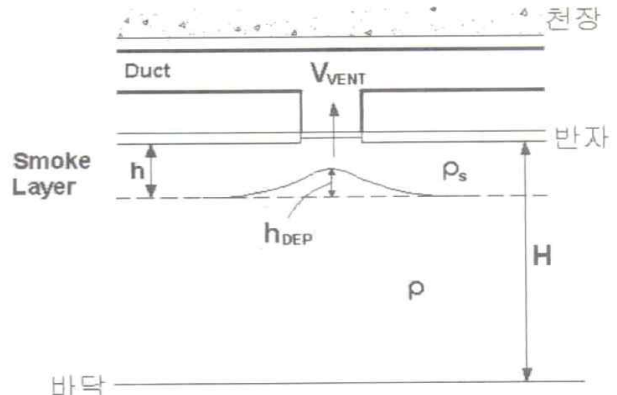
- ① 대규모 공간에서 기계제연을 하는 경우 유입된 신선한 공기(청결층)가 연기층과 함께 직접 배출구로 빠져나가는 현상을 Plug-holing현상이라 한다
- ② Plug-holing현상이 발생되면, 배출설비에 의해 배출되는 연기의 양이 줄어들고, 이로 인해 연기층(Smoke layer)이 확산된다
- ③ 연기층이 평면적으로 확산되어 바닥 부근으로 확산되는 현상을 Door-Effect라고 하며, 이는 연기층의 효과적인 배출과 피난활동을 방해하게 된다

2. 발생(SFPE 3-228)

- ① h_{DEP} 가 연기층(Smoke layer)의 깊이 h 이상일 경우에 발생
- ② "Froude수"와 " h "에 의해 발생여부를 추정
- ③ " $h_{DEP} > h$ "가 되어 플러그 홀링 현상이 발생

$$F_r = \frac{(V_{VENT}) \times (A_{VENT})}{\left(\left(\frac{g(\rho_s - \rho)}{\rho} \right)^{\frac{1}{2}} \times h^{\frac{5}{2}} \right)}$$

여기서, 임계 프루우드 수 : $F_{r_{cr}} = 1.6$



3. 방지대책

(1) 공기 유입구 대책

- ① 공기 유입구를 낮은 곳에 설치한다
- ② 공기 유입량을 적절히 조절해서 유입되는 공기에 의해 Smoke Plume이 교란되지 않도록 한다
- ③ 하나의 유입구에서 다량의 공기를 유입시키지 말고, 여러 개의 유입구에서 분산되어 유입되도록 한다
- ④ 유입풍도의 유속을 느리게 한다

(2) 배기구의 분할

- ① 배기구를 분할하여 배출구별 최대배출용량을 제한한다
- ② 배출구의 최소수량은 하나의 배출구에서 플러그 홀링 없이 배출할 수 있는 최대 배출량을 초과하지 않도록 결정한다
- ③ 배출구의 최소수량보다 많은 수량은 허용된다(즉, 배출구의 크기를 줄이고 배출구 수량을 더 많게 할 수 있다)
- ④ 플러그 홀링 없이 배출할 수 있는 최대배출량 계산식(NFPA 92B)

(3) 배출구의 크기제한 및 배치기준(NFPA 204)

- ① 배출구의 규격 및 배치는 플러그 홀링이 없도록 해야 한다

- ② 배출구 하나의 크기는 연기 층의 깊이가 a 라 하면, $2a^2$ 을 초과하지 않아야 한다
- ③ 배출구의 장변길이가 단변길이의 두 배를 넘는 경우는 단변의 길이는 설계 연기 층 깊이(h)보다 길지 않아야 한다
- ④ 최대 배출구면적 계산식(SFPE 3-229)

※ 기출문제분석19(화재플럼관련)

1. Fire Plume을 설명하시오(60회,10점)
2. 화재 플럼(Fire Plume)에 대한 Froude모델링과 압력모델링을 구분하여 설명하시오(72회,25점)
3. 실내화재시 화원을 중심으로 열연기 거동은 화염(plume), 고온열가스층(ceiling plume zone 및 ceiling jet zone) 및 청정공기층으로 구분할 수 있다. 이를 존모델 그림 형태로 표시하고 화재모델링을 이용하여 온도, 열유속, 열기류의 직접 접촉 등 열연기 거동을 평가할 수 있는 항목을 열거하고 기술하시오(79회,25점)
4. 화재 시 연기의 부력이 미치는 영향을 설명하시오(55회,15점)
5. Ceiling jet flow를 설명하시오(59회,5점)
6. 화재 시 천정제트흐름(Ceiling jet flow)의 특징을 간단히 설명하시오(93회,10점)
7. 연기의 단층화를 설명하라(42회,5점)
8. 제연설비에서 Plug-Holing 현상 및 방지대책에 대하여 설명하시오(97회,10점)

문제5) 목재의 발화

1. 목재의 구성

- ① 셀룰로오스 50[%], 리그닌 25[%], 헤미셀룰로오스 : 25[%]로 구성(주성분)
- ② 셀룰로오스 : 300[°C]로 장시간 가열하면, 5[%]정도만 숯으로 남는다(휘발분 많음)
- ③ 리그닌 : 400 ~ 450[°C] 이상으로 가열하면, 50[%]정도가 숯으로 남는다
- ③ 목재를 450[°C] 이상으로 가열하면 약 15 ~ 20정도의 숯이 남는다

2. 목재의 발화 Mechanism

(1) 목재의 가열 및 수분증발

- ① 200[°C](100~160°C) 정도, 수분이 증발되고 분해를 시작하여 수증기, CO₂, 가연성 가스가 발생되기 시작
- ② 착색하여 탄화의 외관을 보임

(2) 목재의 분해

- ① 260[°C](220~260°C) 정도, 급격한 분해가 되며 가연성 가스의 발생이 현저하여 불씨를 가져가면 인화
- ② 목재의 인화점은 260[°C]로 목재류는 260[°C] 이상이면 위험

(3) 목재의 탄화종료 및 발화

- ① 300~350[°C] 정도에서 탄화종료
- ② 400[°C] 정도, 분해가 격심하고 자기 스스로 발화
- ③ 목재의 발화점

3. 목재의 발화에 영향을 주는 인자

- ① 목재의 외형
: 표면적이 클수록 공기 접촉 면적이 커지고, 방열손실이 줄어들어 발화가 촉진된다
(툽밥 > 대패 밥 > 통나무 순으로 발화가 용이함)
- ② 목재의 종류
: 활엽수는 침엽수에 비해 발화가 잘 이루어지지 않는다
- ③ 목재의 밀도
: 저밀도의 목재는 고밀도의 목재보다 발화점이 낮다
- ④ 수분함량
: 일반적으로 수분함량이 15[%] 이상인 경우에는 고온의 열원에 장시간 노출되어도 발화가 쉽게 일어나지 않는다
- ⑤ 공기속도
: 공기속도가 빠르면, 열분해에 의해 발생한 증기가 희석되어 발화가 늦어진다
- ⑥ 점화원의 크기(가열속도, 시간)
- ⑦ 연소속도

4. 목조건축물의 화재

(1) 목조건축물의 화재원인

- ① 접염 : 건축물과 건축물이 연결되어 불이 옮겨 붙는 것
- ② 비화 : 불씨가 날아가서 다른 건축물에 옮겨 붙는 것
- ③ 복사열 : 복사파에 의해 열이 높은 온도에서 낮은 온도로 이동하는 것

(2) 각 단계별 화재의 진행과정

① 화재원인에서 무염착화

- ㉠ 이 단계는 화재의 원인과 종류, 발생장소에 따라 차이가 있으며 자연발화의 경우에는 오랜 시간을 요한다.
- ㉡ 무염착화란 가연물질이 연소할 경우 재로 덮인 숯불 모양으로 불꽃 없이 착화하는 현상으로 바람 및 공기가 주어질 때 언제든지 불꽃 발생이 가능한 단계

② 무염착화에서 발염착화

- ㉠ 무염상태의 가연물질에 바람 및 공기 등을 불어 넣어 충분한 산소의 공급으로 불꽃이 발하여 착화(발화)하는 현상
- ㉡ 화재원인에서 발화까지를 화재의 전기, 발화에서 진화까지를 화재의 후기라 함

③ 발염착화에서 발화

- ㉠ 이 단계는 착화가 발생한 위치와 가옥의 구조에 따라 달라진다.
- ㉡ 발화란 가옥의 실내 가연물의 일부가 발화한 상태가 아니라 천정까지 불이 번져 가옥 전체에 불기가 도는 시기를 말한다

④ 발화에서 최성기

- ㉠ 이 단계에서는 화재의 진행은 빨라지게 된다. 연기의 색은 백색에서 흑색으로 변한다. 이 시기를 Flash-over라 하는데 이 때의 실내온도는 약 800~900[°C]정도가 된다
- ㉡ 이후 최성기로 넘어가면 천정 및 대들보가 내려앉고 화염 및 검은 연기, 강한 불꽃 및 불가루를 유동시키는 복사열이 발생하는데 이때 실내 최고 온도는 약 13,00[°C]정도가 된다

⑤ 최성기에서 연소낙하

- ㉠ 최성기를 넘어서면 가연물이 연소에 의해 소진되고 화세가 급격히 약해지면서 지붕이나 벽이 무너지고 기둥 등이 허물어져 내리는 시기이다
- ㉡ 풍속이 거의 없을 때(0~3m/s)시간 경과
 - ㉠ 발화에서 최성기까지의 소요시간 : 4~14분
 - ㉡ 최성기에서 연소낙하까지의 소요시간 : 6~19분
 - ㉢ 발화에서 연소낙하까지의 소요시간 : 13~24분

※ 기출문제분석20(목재발화관련)

- 1.목재 가공품의 발화점을 바꿀 수 있는 요인을 논하고 목재 발화의 4단계를 설명하시오(42회,20점)
- 2.목재류의 발화시의 Mechanism과 발화 후의 연소특성에 대하여 체계적으로 설명하시오(52회,20점)

문제6) 연기 발생의 Mechanism

1. 연기의 개념

- (1) 연기란, 연소 및 열분해 생성물 중에서 공기 중에서 부유하며 육안으로 볼 수 있는 것으로 기체상의 연소 및 열분해가스와 공존하므로 이러한 가스를 포함한 것을 연기라 한다
- (2) 연기의 구성
 - ① 고온의 수증기, CO₂
 - ② 가시성의 휘발생성물
 - ③ 불완전연소 생성물
 - ④ 작은 타르입자
 - ⑤ Plume에 흡입된 공기

2. 연기의 생성과정

- (1) 고체 미립자계 연기
 - ① 연료입자가 화염 중에서 연소 화학반응에 의한 연소생성물이다
 - ② 탄소가 많은 물질이 생성되어 화염으로부터 유리되어 연기로 배출된다
 - ③ 보통 불완전 연소가 이루어지므로, 유리탄소가 모두 산화되지 못하고 화염 밖으로 배출된다
- (2) 액체 미립자계 연기
 - ① 재료의 열분해 생성가스가 냉각, 응축한 연기로 훈소나 무염 연소 등에서 발생되며, 담배 연기도 액체미립자계 연기이다
 - ② 훈소 등에서는 여러 가지 원인으로 인해 발염이 이루어지지 않아 열분해 생성물이 화염을 통과하지 않고 그대로 방출된다
 - ③ 화염을 통과하지 않은 분해생성물은 액화물질로 구성되며 독성이 크며, 불꽃연소에서의 고체미립자계 연기와 성질이 다르다

3. 연기별 특성

- (1) 고체 미립자계 연기
 - ① 연소의 결과로 발생하는 흑색의 탄소 응집체이다
 - ② 연료의 종류와 관계없이 공통적 성질을 가진다
 - ③ 산소가 많은 연료에서는 흑연이 발생되며, 독성이 비교적 적다
- (2) 액체 미립자계 연기
 - ① 입자의 지름, 크기와 성분에 따라 다양한 색상을 띤다
 - ② 연료의 종류에 따라 냄새, 독성 등의 특성이 달라진다

4. 연기의 유해성

(1) 연기의 영향

- ① 시계의 저하 : 피난장애 및 소방대원 활동의 장애를 일으키므로 연기의 농도는 감광계수에 의한 농도표시법을 사용한다
- ② 연기에 의한 공포 : 연기를 보고 놀라 아무것도 할 수 없는 상태로 몸이 굳어버리는 패닉(panic)현상을 유발할 수 있다
- ③ 연기에 의한 연소 : 실내에 축적된 고온의 연기에 의해 실내 연소상황이 달라진다

(2) 연기의 위험성

- ① 자극성·독성 가스 : 연소시 발생하는 연기 속에 포함된 CO, HCN, HCl, COCl₂, CO₂ 등으로 인체에 치명적인 피해를 준다
- ② 최면·마취성 가스 : 케톤(ketone)류 등은 폐에는 영향을 주지 않으나 호흡기를 통해 신경에 도달시 정신착란, 의식불명 등을 일으킨다
- ③ 감지할 수 없는 독성가스 : 일산화탄소, 질소산화물 등은 냄새가 없어 호흡장애를 일으킬 때까지 가스의 영향을 느끼지 못한다

(3) 일산화탄소에 의한 중독

- ① 헤모글로빈(Hb)과 결합하는 능력이 산소보다 210배 이상 높기 때문에 폐에 흡수된 CO는 바로 카복시헤모글로빈(HbCO)이 되며 산소의 공급을 차단시킨다
- ② 일산화탄소의 미량 흡입으로도 인체에 큰 위협이 될 수 있다

(4) 이산화탄소에 의한 중독

- ① 공기 중에 0.03 ~ 0.04[%]를 함유하고 있고 인간의 호흡기 중에 4[%] 이상 포함되어 있어 큰 위험이 되지 않는다
- ② 그러나, 연소시 발생 비율이 높고 실내에 빠른 속도로 축만하게 될 경우 호흡속도(RMV)를 증가시켜 유해가스의 흡입율을 높이게 된다

※ 기출문제분석21(연기생성관련)

1. 연소생성물중 가스, 불꽃 및 열에 대해 설명하시오(57회,20점)
2. 화재발생에 따른 인명 피해의 큰 원인 중의 하나가 연기 발생에 있다. 동 연기 생성에 영향을 미치는 인자 을 열거하고 이들에 대하여 설명하시오(35회,20점)
3. 건물화재 시 연기는 액체미립자계와 고체미립자계가 있는데 다음 사항에 대하여 설명하시오(66회,25점)
①생성과정 ②연기종류 ③연기특성
4. 화재 시 건물내 연기의 특성 및 작용에 대하여 설명하시오(55회,15점)
5. 건축 재료는 목질계, 합성수지계, 천연섬유계(실크, 양털류 등)로 대별된다. 이러한 건축 재료가 연소될 때 발생하는 연소생성가스의 종류, 위험성, 연소조건에 따른 연소생성물의 조성에 대하여 기술하시오(83회,25점)

문제7) 연기의 농도표시

1. 연기의 농도 측정방법

(1) 연기 중량농도[mg/m³](절대농도)

- ① 연기를 여과시켜 입자상의 물질을 채취하여 그 무게를 측정
- ② 연기의 색이나 크기 등과는 무관함
- ③ 소규모 측정

(2) 연기 입자농도[개/cm³](절대농도)

- ① 정해진 부피의 연기를 모아 그 내부의 연기 입자수를 측정
- ② 입자의 형상, 크기 및 색상 등과 무관함
- ③ 소규모 및 중규모 측정

(3) 투과율법(상대농도)

- ① 감광계수로 표시되는 연기농도와 가시거리가 반비례함을 이용한 것
- ② 연소실에서 유동상태인 연기의 광학밀도를 측정하고, 이를 시간에 대해 적분하여 연기의 수율을 측정한다

2. 광학밀도(Optical density)

(1) 개념

- ① 연기내의 고체나 액체의 광학적인 밀도를 나타낸다

$$D = -10 \log \left(\frac{I}{I_0} \right) = 10 \log \left(\frac{I_0}{I} \right) = 10 \log \left(\frac{1}{T} \right)$$

여기서, D : 연기의 광학밀도 [dB]

I_0 : 연기가 없을 때의 빛의 세기 [lx]

I : 연기가 있을 때의 빛의 세기 [lx]

T : 광투과율

- ② 광학밀도가 1.0이라는 것은 90[%]의 입사광이 차단되었음을 의미한다
- ③ 광학밀도와 감광계수 사이의 관계

$$\frac{D}{L} = \frac{10}{2.303} C_s$$

(2) 광선차단성(Light Obscuration, 암흑도)

- ① 연기에 의하여 빛이 차단되는 정도를 연기 층 통과 시 감쇠된 양만큼의 빛의 강도의 입사광에 대한 비를 백분율로 나타낸 값
- ② 빛이 연기 중을 통과할 때 광속의 저감에 대한 측정을 의미한다

$$S = 100 \left(\frac{I_0 - I}{I_0} \right) = 100 \left(1 - \frac{I}{I_0} \right)$$

여기서, S : 광선차단성 [%]

I_0 : 입사광속의 강도

I : 연기를 통과한 후의 수광체가 받는 강도

(3) 광학밀도와 광선차단성의 상호관계

$$D = 2 - \log_{10}(100 - S) \quad (\text{암흑도 } 10 \rightarrow \text{광학밀도 } 0.46)$$

3. 감광계수(Smoke Concentration)

(1) Lambert-Beer 법칙

① 연기농도(감광계수, C_s)와 감광률($\frac{I}{I_0}$) 사이의 관계를 나타낸 법칙

② $I = I_0 \cdot \exp[-C_s \cdot L]$
여기서, I : 연기가 있을 때의 빛의 세기 [lx]
 I_0 : 연기가 없을 때의 빛의 세기 [lx]
 C_s : 감광계수 [m^{-1}]
 L : 연기층의 두께 [m]

(2) 감광계수(C_s)

- ① $I = I_0 \cdot \exp[-C_s \cdot L] \Rightarrow C_s = \frac{1}{L} \ln\left(\frac{I_0}{I}\right)$
- ② 이 식에서, 거리가 멀수록 감광계수는 작아지고 또 연기가 진할수록 I 가 작아지게 된다
- ③ 감광계수는 이 I 의 값에 직접 반비례하는 것이 아니고 자연대수의 값에 반비례해서 커진다는 의미

(3) 감광계수의 주요수치

- ① 연기감지기의 일반적 작동농도 : $0.1[m^{-1}]$
- ② 불특정 다수가 출입하는 장소에서의 연기 한계농도 : $0.1 \sim 0.2[m^{-1}]$
- ③ 최성기에 도달한 발화 층의 감광계수 : $5 \sim 10[m^{-1}]$

4. 비 광학밀도(Specific optical density)

(1) 개념

- ① 미국 표준국(NBS)에 의한 광학적 농도
- ② ASTM E662인 고체재료에서 발생하는 연기의 비광학농도측정법
- ③ 연직으로 놓인 $76[cm^2]$ 의 표본에 $25[kw/m^2]$ 의 방사에너지를 방사하여 가시연기의 양을 산정한다
- ④ $D_s = D \times \left(\frac{V}{AL}\right)$
여기서, D_s : 비 광학밀도, D : 광학밀도, V : 측정용기의 부피
 A : 시료(샘플)의 면적, L : 빛의 통과경로의 길이

(2) 응용

- ① 다른 연소생성물들의 연기생성 잠재력 산출의 근거를 제시한다
- ② 연기가 건물의 다른 구획 실이나 어떤 용적으로 팽창될 때 연기의 광학밀도를 측정할 수 있다
- ③ 비 광학밀도의 특성치는 사용된 샘플의 두께와 열적 노출조건 하에서의 어떤 생성물의 연기생성의 성질을 나타낸다

문제8) 연기의 피난한계농도

1. 가시도(Visibility)

(1) 개념

- ① 대상물의 존재 또는 형상의 보기 쉬운 정도
- ② 가시도는 대비, 광속발산도, 물체의 크기, 노출시간, 휘광, 움직임(관찰자 또는 물체) 등에 의해 행동에 영향을 준다(=시인성)

(2) 가시도의 영향 인자

- ① 연기의 특징 : 색, 크기, 밀도, 산란, 흡수 등
- ② 환경 : 목표물의 크기와 색, 조도, 빛의 파장 등
- ③ 관찰자 : 개인의 암순응과 명순응의 여부, 관찰자의 상태(정상상태, 패닉상태)

(3) 대비값(C_V)

- ① 특정 사물을 보기 위해서는 해당사물과 배경 간에 어느 정도 수준의 대비가 형성되어야 한다
- ② 물체의 조명도에 의존되는 계수로 1 ~ 4의 범위
- ③ $C_V = \left(\frac{B}{B_0} \right) - 1$
여기서, B : 해당 사물의 밝기(휘도)
 B_0 : 배경의 밝기(휘도)

2. 가시거리(간파농도, L)

(1) 정의

- ① 전방의 목표물을 식별할 수 있는 거리

$$\textcircled{2} L = \frac{C_V(\text{대비값})}{C_S(\text{감광계수})}$$

(2) 물체별 가시거리

- ① 반사판형 표지 및 문짝 : $L = \frac{2 \sim 4}{C_S} [m]$
- ② 발광형 표지 및 주간의 창 : $L = \frac{5 \sim 10}{C_S} [m]$

(3) 한계가시거리

- ① 일반적으로 건물 내를 잘 알고 있는 사람(숙지자) : 5[m]
- ② 일반적으로 건물 내를 잘 알지 못하는 사람(비 숙지자) : 30[m]
- ③ 감광계수는 0.17~0.33정도가 되어야 하며, 이는 화재실에서 발생한 연기농도의 $\frac{1}{100} \sim \frac{1}{300}$ 로 희석되지 않으면 안되는 것을 의미한다

3. 감광계수와 가시거리와의 관계

(1) 가시거리(L)와 감광계수(Cs)와의 관계

$$Cs \circ L = \text{const}(\text{일정})$$

(2) 감광계수에 따른 가시거리의 변화

감광계수(m ⁻¹)	가시거리(m)	상 황
0.1	20 ~ 30	◦ 건물 내 비 숙지자의 피난한계농도 ◦ 연기감지기가 작동할 정도의 농도
0.3	5	◦ 건물 내 숙지자의 피난한계농도
0.5	3	◦ 어두침침한 것을 느낄 정도의 농도
1	1 ~ 2	◦ 거의 앞이 보이지 않을 정도의 농도
10	0.1 ~ 0.5	◦ 화재최성기 때의 연기농도
30	-	◦ 출화실에서 연기가 분출할 때의 연기농도

※ 기출문제분석22(연기농도관련)

1. 연기농도 표시방법 3가지를 열거하라?(48회,10점)
2. 가연성물질에 의한 발생연기의 농도를 표현하는 방법으로 절대농도와 상대농도가 있는바, 이들에 대하여 비교 설명하시오(52회,20점)
3. 연기의 밀도는 빛의 차단율(light obscuration) 또는 광학밀도(optical density)로 나타내는 것이 보통인바, 이 두 가지의 수식을 쓰시오(54회,10점)
4. 감광계수에 대해 설명하시오(61회,10점)
5. 감광계수 $[m^{-1}]$ 와 가시거리 $[m]$ 의 관계와 연관하여 연기의 피난한계 등에 대하여 간단히 설명하시오(71회,10점)
6. 화재 발생 시 피난의 중요한 인자로 작용하는 감광계수, 광학밀도, 가시거리에 대해 기술하시오(75회,25점)
7. 화재 시 발생하는 연기의 특성과 감광계수에 대하여 설명하시오(80회,10점)
8. 가시도(Visibility)에 대하여 설명하시오(85회,10점)

문제9) 연소 시 유해가스

1. 마취성 가스

(1) 일산화탄소(CO)

- ① 최대허용농도 : 100[ppm]
- ② 독성은 큰 편이 아니지만, 화재 시 다량 발생하고 거의 모든 화재에서 발생
- ③ 불완전 연소에 의해 탄소성분이 CO로 배출
- ④ 유해성 : 혈액내의 헤모글로빈(Hb)과 결합되어 산소결핍을 유발시킨다
 - ㉠ $\text{Hb} + \text{CO} \rightarrow \text{COHb}$ (카복시 헤모글로빈)
 - $\text{O}_2\text{Hb} + \text{CO} \rightarrow \text{COHb} + \text{O}_2$ (옥시헤모글로빈 : 폐에서 산소운반)
 - ㉡ CO는 Hb에 대한 결합력이 O₂보다 210배 정도 강하며, COHb는 잘 분해되지 않는다. 즉, CO는 혈중 산소농도 저하로 산소결핍을 유발시킨다
 - ㉢ $\text{COHb}[\%] = 0.33 \times \text{RMV} \times X_{\text{CO}} \times t$
여기서, RMV : 분당 호흡량[lpm], X_{CO} : CO의 vol%, t : 노출시간[min]

⑤ 농도별 영향

0.05[%]	3시간 노출시 위험
0.15[%]	1시간 노출시 위험
0.4[%]	1시간 이내 노출에 치사
1.3[%]	수회 호흡으로 의식 잃고, 수분 내 치사

(2) 이산화탄소(CO₂)

- ① 허용농도 : 5,000[ppm]
- ② 생리적으로 비 독성 가스로 분류되지만, 화재 시 다량 발생하여 산소농도를 저하시킨다
- ③ 실제 화재 시 호흡속도(RMV)를 증가시켜 유해가스의 흡입율을 높인다
- ④ 농도별 영향

공기중 CO ₂ 농도	인체에의 영향	공기중 CO ₂ 농도	인체에의 영향
2[%]	호흡심도 50[%] 증가	8[%]	호흡 곤란
3[%]	호흡심도 100[%] 증가	10[%]	의식 상실
5[%]	호흡과중, 두통 등	20[%]	단기간 사망

(3) 시안화수소(HCN)

- ① 허용농도 : 10[ppm]
- ② 질소함유 물질(울, 실크, 나일론 등)의 연소 시에 발생
- ③ CO에 비해 빠르게 작용 한다
- ④ 독성 : 인체 내 세포조직에서의 산소 사용을 방해한다

2. 자극성 가스

(1) 아크로레인(Acrolein)

- ① 허용농도 : 0.5[ppm], 10[ppm]이상 시 즉사

- ② 석유제품, 유지류 등의 연소 시 발생
- ③ 강한 자극성으로 감각기관과 폐를 자극한다

(2) 염화수소(HCl)

- ① 허용농도 : 5[ppm]
- ② 염소가 함유된 유기물(PVC 등)에서 발생
- ③ 열분해 시 염화수소 이탈로 발생
- ④ 눈, 기관지 등을 자극하여 행동 장애를 유발한다
- ⑤ 금속에 대한 부식성으로 철골에도 손상을 유발한다

(3) 아황산가스(SO₂, 이산화황)

- ① 허용농도 : 5[ppm]
- ② 유황함유 물질 완전연소 시에 발생
- ③ 흡입시 점막액과 황산을 형성하여 염증을 유발한다
- ④ 금속의 부식도 초래 한다

(4) 황화수소(H₂O)

- ① 허용농도 : 20[ppm]
- ② 석유정제물, 펄프 등 유황 함유물질의 불완전연소로 발생
- ③ 흡입 시 세포호흡이 중지되어 질식될 우려가 있다
- ④ 자극성이 커서 눈물이 많이 나게 하며, 썩은 달걀 냄새가 난다

(5) 포름알데히드(HCHO)

- ① 가구류 등의 접착제 성분으로 목재가구나 합판 등의 연소 시에 발생
- ② 저 농도에서부터 자극성이 있다

(6) 포스겐(COCl₂)

- ① 2차 세계대전 때 나치의 유태인 학살에 이용된 가스
- ② PVC 연소 시에 발생 된다
- ③ CCl₄가 소화약제로 사용될 때에도 고열 금속과 접촉되면 발생될 수 있다

(7) 이소시아네이트 등

- ① 이소시아나화기(-NCO)를 가진 화합물
- ② 배관단열재, 페인트 등에서 배출
- ③ 완전연소 시에도 발생

3. 연료별 생성가스

CO, CO ₂	C를 포함한 모든 가연물
NO _x	셀룰로이드, 폴리우레탄
HCN	질소 포함된 모, 비단, 피혁
아크로레인	석유, 유지류
SO ₂	나무
HF, HCl, HBr, 포스겐	PVC, 방염수지
암모니아	나일론
벤젠	스티로폼

문제10) 화재가 인체에 미치는 영향(손상)

1. 열적 손상

(1) 개요

- ① 화재는 높은 온도의 대류와 복사전열을 통해 인체에 손상을 초래한다
- ② 고온에 의한 열적 손상에는 비교적 장시간 동안의 노출에 의한 열응력과 즉각적으로 발생하는 화상 및 고온흡입에 의한 호흡기관 손상을 들 수 있다

(2) 열응력

- ① 체온이 41[°C] 이상으로 상승되면 열응력이 발생되며, 땀·호흡 등의 방열량보다 열흡수가 커서 생긴다
- ② 지속적으로 체온이 상승되어 의식을 잃고 사망하게 된다

(3) 화상

- ① 비교적 단시간 내의 화상 : 4 [kw/m²] 이상
- ② 피부는 45[°C]에 도달하면 통증을 느끼게 되며, 이러한 통증을 일으키는 주위온도는 200[°C] 이상이 된다(한계 : 200[°C])
- ③ 피부에 대한 복사열의 영향 평가는 피부에 수포 화상이 발생하는 때까지의 시간으로 표현된다(445[°C])
- ④ 화상의 분류
 - ㉠ 1도 화상 : 홍반성 화상
 - ㉡ 2도 화상 : 수포성 화상
 - ㉢ 3도 화상 : 괴사성 화상
 - ㉣ 4도 화상 : 흑색 화상

2. 비열적 손상

(1) 마취성 가스

(2) 자극성 가스

(3) 연기에 의한 가시도 악화

- ① 빛이 연기중의 검댕 같은 입자나 타르성의 응축성분에 의해 감소되어 가시도가 저하 된다
- ② 연기에 의한 가시도 악화는 화재의 첫 번째 영향으로서, 열적 손상이 문제되기 이전에 발생 된다
- ③ 가시도는 물체의 조명도 계수와 감광계수의 비로 표시되는 가시거리로 표시된다

※ 기출문제분석23(연소시 유해가스관련)

1. 연소 시 생성물이 인체에 미치는 영향을 설명하시오(55회,15점)
2. 화재 시 인체에 대한 온도의 영향에 대해 설명하시오(59회,20점)
3. 목재 화재의 연소생성물과 인체에 미치는 영향을 설명하시오(45회,20점)
4. 연소중 CO가스의 발생 과정을 설명하고, 이 가스가 인체에서 작동과 미치는 영향에 대하여 기술하시오(38회,15점)
5. 화재시 발생하는 CO, CO2가스 및 O2 연기의 위험한계(허용치)를 기술하시오(38회,20점)
6. 화재시 치사의 주요 원인이 되는 일산화탄소, 이산화탄소, 황화수소, 이산화황의 위험 특성을 설명하시오(62회,10점)
7. 연소생성물과 유해성에 대하여 논하시오(74회,25점)

문제11) 연기발생의 정량적 평가

1. 발연계수(Smoke Generation Coefficient)

- ① 발연량은 감광계수를 연기의 체적에 곱한 값으로 정의 되며, 면적의 차원을 갖는다. 이것은 전체 연기입장에 의한 소산단면적에 해당된다
- ② 발연계수는 소정의 조건하에서의 재료의 단위 중량당의 발연량으로 이 값이 클수록 다량의 연기가 발생함을 나타낸다(온도에 대하여 직선성을 가짐)

③ $K = C_s \cdot \left(\frac{V}{W} \right)$

여기서, K : 단위 중량당의 발연량(= 발연계수 [$C_s \cdot m^3/kg$] 또는 [m^2/kg])

V : 발생한 연기의 체적 [m^3]

W : 재료의 분해 또는 연소중량 [kg]

④ 발연계수의 영향인자

- ㉠ 재료의 종류 및 크기
- ㉡ 각 재료의 조성 및 특성
- ㉢ 첨가물의 유무 및 종류
- ㉣ 온도
- ㉤ 산소의 공급 등

2. 발연속도

- ① 광학적 농도를 사용하여 연기의 발생속도(발연속도)를 표시하면 재료의 연소속도와 발연계수의 곱으로 나타낸다
- ② 발연속도와 발연계수 · 온도의 관계식

$$\text{발연속도} = K \cdot \left(\frac{dW}{dt} \right) = (A - B \cdot T) \cdot \left(K_0 \cdot W_0 \cdot \exp \left[\frac{-E_a}{R \cdot T} \right] \right)$$

여기서, W : 가연시료의 중량, t : 연소시간

K_0 : 반응의 빈도계수, W_0 : 초기의 연료중량

R : 기체상수, E_a : 활성화 에너지

3. 발연계수와 온도와의 관계

① $K = A - B \cdot T$

여기서, A 및 B 는 재료에 따라 변하는 상수

- ② 발연계수는 온도에 대하여 직선성을 가지고 있고 온도 증가에 따라 발연량은 감소
- ③ 훈소의 특징은 느린 저온 무염연소이므로 온도가 낮아 불꽃연소보다 발연량이 많음을 알 수 있다

4. 독성지수

- ① 재료의 단위 질량당 발생하는 유해 가스량을 독성지수라 하며 일반적으로 1 ~ 1200 사이의 값을 가진다

② 독성지수의 표현

$$T = t \cdot \left(\frac{V}{W} \right) = \left(\frac{C}{C_f} \right) \cdot \left(\frac{V}{W} \right) [l/g]$$

여기서, t : 독성 분위기, V : 유해가스의 체적, W : 연료의 중량
 C_f : 가스가 30분간 폭로로 인간에게 치명적인 영향을 주는 농도

5. Hinkley공식과 발연계수

- ① Hinkley공식은 어떤 공간에 대하여 연기로 채워지는데 소요되는 시간, 즉 연기 층 하강시간의 개념이다

$$② t = \frac{20A}{P\sqrt{g}} \cdot \left[\left(\frac{1}{\sqrt{y}} \right) - \left(\frac{1}{\sqrt{x}} \right) \right]$$

여기서, t : 소요시간[sec], P : 화재의 *Perimeter*(화원의 둘레)
 g : 중력가속도($9.8m/s^2$), A : 구획실의 바닥면적 [m^2]
 y : 청결층의 높이 [m], h : 구획실의 높이 [m]

- ③ 불꽃에 의해 흡입되는 가스량(즉, 연기생성량)

$$M = 0.188PY^{\frac{3}{2}}$$

여기서, M : 연기생성량 [kg/sec]
 P : 화재의 *Perimeter*
 Y : 청결층 높이

※ 기출문제분석24(발연계수관련)

1. 가연물의 발연계수를 설명하시오(45회,10점)
2. 재료의 발연계수를 설명하시오(52회,6점)
3. 소방시설 설치유지 및 안전관리에 관한 법률 제12조 제3항, 동시행령 제20조 제2항(방염대상 물품 및 방염성능기준)의 구체적인 방염성능기준 중 소방방재청장이 정하여 고시한 방법으로 발연량을 측정하는 경우, 최대연기밀도는 400이하로 되어 있다. 이의 의미는 무엇인지 구체적으로 설명하시오(93회,25점)