

# 燃燒 生成物의 粒徑 分布와 燒氣感知器 作動에 미치는 影響

河 正 鎬\*

이 글은 本人이 1982年 9月부터 11月까지 約 2個月間 日本 自治省 消防研究所에서 研修中에 指導 받은 內容으로서 高層建物等 大型 建物에서 火災의 早期 感知 및 誤動作 抑制에 많은 問題點이 擡頭되고 있어 同 研究所의 竹元昭夫氏와 渡邊彰夫氏가 共同 研究한 結果이다.

煙氣感知器의 作動에 影響을 미치는 燃燒 生成物에 대한 根本的인 研究 結果는 우리나라 도 '86 Asian Game 및 '88 Olympic 등을 對備한 大型 Hotel 등의 早期 火災 警報 體制를 위해 많은 도움이 될 것으로 思料되어 紹介한다.

翻譯者 註.

## 1. 緒 言

이 研究는 火災 初期에 粒子 狀態의 燃燒 生成物에 대해서 눈에 보이는 煙氣 뿐만 아니라 그보다도 훨씬 작은 눈에 보이지 않는 粒子 成分도 총괄하여 粒徑 分布를 測定하고 이와 煙氣感知器 作動과의 關聯性을 檢討하고자 하는 것이다.

現在 널리 使用되고 있는 煙氣感知器는 그 作動 原理에 따라서 減光式, 散亂光式 및 이온(ion)化式으로 分類할 수 있다. 이들 感知器의 作動 性能은 여러가지 初期 火災 條件下에서 실제로 室內와 集煙상자 內에서 試

驗하고<sup>1~10)</sup> 또 여러가지 假定下에서 感光式과 散亂光式의 경우는 Mie 理論에 의해서 理論的으로 說明하였으며 또한 이온化式의 경우는 燃燒 生成物 粒子가 空氣 이온에 附着하는 現象으로서 說明하였다.

一般的인 火災 研究 分野에서 煙氣 濃度を 煙氣中에서 빛의 減衰를 利用하여 測定하는 것과 같이 煙氣感知器도 여과지등의 一定한 煙氣中에서 어느 정도 減光될 때 作動되는지에 의해서 感度가 規定되어 있다.<sup>19~22)</sup> 그러나 感知器의 作動은 소위 減光度와는 달라서 燃燒 條件 및 流動 條件에 의한 燃燒 生成物 粒子의 幾何學的·光學的·電氣的 特性的 영

\* 正會員, 韓國火災保險協會

향을 받기 쉽다. 이를테면 이온化式 煙氣感知器는 發災 燃燒에 예민하고 薰燒 煙氣나 時間이 경과된 煙氣에는 둔감하다는 것이다. 그러나 이들의 구체적인 原理와 理由에 대해서는 現在까지 잘 알려지지 않고 있다.<sup>11, 12, 13)</sup>

그래서 研究 팀은 각종 煙氣感知器 作動을 說明하기 위한 資料를 얻기 위하여 火災 初期에서 少量의 特定 可燃物을 여러 條件下에서 燃燒시켜 그 燃燒 生成物の 粒徑 分布를 調査하기로 하였다. 燃燒 生成物 粒子는 일반적으로 液滴을 포함한 많은 微粒子들이기 때문에 이 實驗에 있어서는 粒子가 가능한 變質되지 않도록 空氣中에 떠 있는 그 狀態에서 작은 粒子까지 測定하기로 하고 또한 煙氣感知器의 作動 原理와 모든 條件이 거의 같도록 선정하기로 하였다. 實驗에 있어서 肉眼으로 볼 수 있는 煙氣 粒子에 대하여는 沈降法과 光散亂 펄스化法으로 測定하고 肉眼으로 識別 할 수 없는 粒子는 이온 易動度 測定器에 의해서 粒徑 分布를 測定하였다.

## 2. 沈降法에 의한 粒徑 測定

粒子의 沈降速度로부터 Stokes 徑을 구하는 것은 담배 연기의 경우에 자주 이용되어 왔다.<sup>24~26)</sup> 이 方法은 보통 光學顯微鏡으로 적은 粒徑을 測定하는 것과는 달리 粒子의 比重, 荷電量을 測定하여 粒徑을 알아 내는 것으로 研究 팀은 우선 沈降法으로 煙氣의 粒徑 測定을 해 보았다.

### 2.1. 實驗方法

沈降 測定用 셀은 라완材를 뽑아 내고 그 内部에 8 mm × 8 mm의 白金 電極板 2枚를 2mm 間隔으로 水平하게 부치고 3개의 側壁에 光束 投射用窓, 測定用窓, 吸煙口 겸 라이트·트랩을 設置하였다.

煙氣는 可燃物을 340 ~ 750 ℃의 電氣爐 內에 投入하여 發生시켰으나 매우 高温으로 燃燒할 경우는 爐의 供給 空氣에 窒素가스를 混合시켜 煙氣가 發生되기 쉽도록 하였다. 煙氣는 다음 式에서 減光係數  $\sigma$ 가 약  $m^{-1}$ 까지 되도록 1 m<sup>3</sup>의 集煙상자에 넣었다.

$$F/F_0 = \exp(-\sigma\ell) = \exp(-\overline{C_{EXT}} Z_0 \ell) \quad (1)$$

위 式에서  $F_0$  및  $F$ 는 煙氣가 없는 경우와 있는 경우의 光束,  $\ell$ 는 光路長,  $\overline{C_{EXT}}$ 는 平均減光斷面積,  $Z_0$ 는 可視煙氣粒子의 個數濃度이며 以下 本文에서 煙氣 濃度は 1 m當의 減光係數  $\sigma$ 로 표시한다.

煙氣는 吸引 펌프로 셀 內에 넣어 熱線을 차단한 超高压水銀燈으로부터의 光으로 煙氣 粒子를 輝點으로서 관측하였다.

현미경의 배율은 144 배이며 煙氣 粒子의 沈降速度는 粒子가 接眼 마이크로미터의 한 눈금 (62.5  $\mu m$ )만 自然沈降하는 時間으로, 測定하였다. 粒子 半徑  $r$  (cm)는 이 沈降速度  $v$  (cm/s)로부터 다음의 Stokes - Cunningham) 式으로 計算하였다.

$$r = -\frac{\beta \ell_m}{2} + \sqrt{\left(\frac{\beta \ell_m}{2}\right)^2 + \frac{9\eta v}{2\rho g}} \quad (2)$$

여기에서  $\beta$ 는 Cunningham 定數,  $\ell_m$ 은 空氣 分子의 平均 自由行程으로서 일반적으로  $\beta \ell_m = 9 \times 10^{-6}$  cm,  $\eta$ 는 空氣의 粘性 係數로  $1.8 \times 10^{-4}$  g/cm.s,  $g$ 는 重力 定數로  $980$  cm/s<sup>2</sup>,  $\rho$ 는 煙氣 粒子의 比重이다.

이제  $p$ 를 素電荷量  $e$  [ $= 4.80 \times 10^{-10}$  C.G.S.e.s.u.]를 單位로 한 粒子의 帶電多重도로 하면 煙氣 粒子의 比重은 自然 沈降速度로 測定한 帶電 電氣 粒子를 電極 사이에 정지시키기 위한 電界强度  $X$  [C.G.S.e.s.u.]를 다음의 두式에 代入하고,  $p = 1, 2, 3 \dots$  등의 경우에 있어서 半徑 및 比重을 測定, 比較할 수 있다.<sup>27)</sup>

$$r = \frac{X_{pe}}{12\pi\eta v} + \sqrt{\left(\frac{X_{pe}}{12\pi\eta v}\right)^2 + \beta\ell m \frac{X_{pe}}{6\pi\eta v}} \quad (3)$$

$$\rho = \frac{X_{pe}}{(4/3)\pi r^3 g}$$

以下の本文에서는 特記事項이 없는 한 粒子의 크기는 모두 直徑으로 하고자 한다.

2.2. 測定結果

一定한 煙氣 濃度가 된 後로부터 10分 사이에 測定한 煙氣 粒子의 直徑 分布는 그림 1과 같으며 그 最多徑(modal diameter)은 0.6~1.0 μm 이었다. 또한 340℃로 加熱한 煙氣의 경우 測定 開始 22~32分 후에 재차 直徑 分布를 求하였으나 最大徑은 여과지(Filter Paper)의 煙氣에는 변하지 않고 杉木(Japanese Cedar)에는 약 0.12 μm 增加하였다.

測定된 煙氣 粒子의 平均 比重은 그림 1의

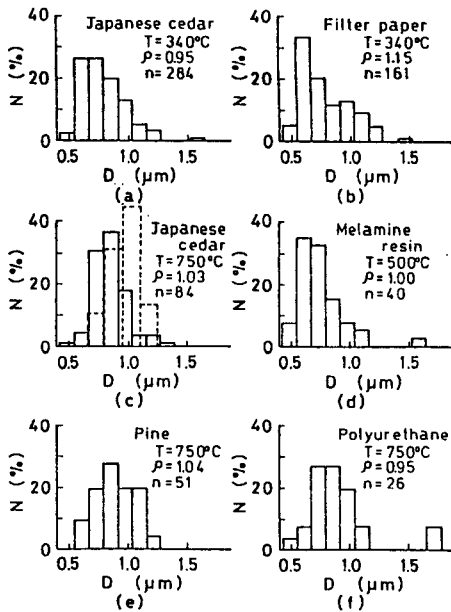


Fig. 1 Size Distribution measured by sedimentation method

N: relative number of particles, D: the diameter of particles, ρ: the mean specific gravity, and n number of observed particles.

Broken lines represent the result obtained by microscopic photograph (Jin, 1971)

註와 같이 0.95~1.15 이어서 대체로 1로 간주하고자 한다.

또한 比重을 求하기 위해 얻어진 帶電多重度는 그림 2에 나타난 바와 같이 粒徑 0.4 μm 以下の 粒子에 있어서는 單一 帶電子이고 직경이 커짐에 따라 帶電量은 增加하였다. 또 高温 燃燒 煙氣의 帶電量은 低温 燃燒時보다 더 컸었다.

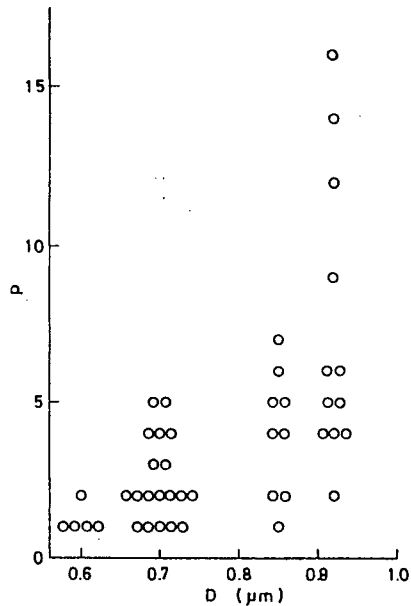


Fig. 2 Relation between the multiplicity of electronic charges, p, and the diameter of particles, D

2.3. 檢 討

研究 팀이 實施한 方法은 舍內의 煙氣 粒子가 安定될 때까지 샘플링후 5~30초 동안 기다렸기 때문에 62.5 μm 을 沈降하는 時間이 1초 이하의 粒子는 감소하고 6초 이상의 것은 심한 브라운운동 때문에 測定이 困難하였다. 따라서 式(2)로 測定 가능한 粒徑은 比重 1의 경우 주로 0.4~1.4 μm 의 범위가 되었다. 그러나 測定 結果는 그림 1(C)와 같이 衝擊法에 의한 현미경 사진 결과<sup>28)</sup>와 거의 一致하고 있다. 또 담배 煙氣에 관한 沈降法의 測定値는 平均 直徑 0.4~1.1 μm , 比重 약

0.74, 帶電多重度 1~10으로 報告되어 있어<sup>24~26)</sup> 이번 측정 결과와 큰 차이는 없는 것으로 判明되었다.

帶電多重도는 空氣中の 이온과 衝突함으로써 時間이 경과됨에 따라 增加하는 경향이 있으며 또 비교적 粒徑이 큰 MgO煙氣는 8~12로 報告되어 있으나 일반적인 에어로졸은 0.1 μm 이하<sup>29)</sup>, 空中電氣의 分野로 0.06 μm 이하는 帶電多重도를 1로 보아도 큰 차이가 없는 것으로<sup>30)</sup> 되어 있다. 이번과 같이 비교적 새로운 煙氣로는 0.4 μm 以下の 粒徑으로서 P=1로 해도 문제가 없을 것으로 結果가 나타났다.

### 3. 90° 散亂光에 의한 粒徑 測定

#### 3.1. 測定方法

測定 裝置의 概要는 그림 3과 같다.

可熱物은 各國에서 煙氣感知器 試驗用的 標準 火災源으로서 제안되어 있는 것을 선택하였다. 煙氣는 원칙적으로 電氣爐內의 金屬網製 筒에 0.5~1.0g의 可燃物을 一定 溫度 또는 一定 溫度 上昇率로 加熱하여 發生시켰다. 이 煙氣는 爐의 上部 약 1m<sup>3</sup>의 集煙 상자에 爐로부터 열대류를 이용하여 넣었고 또 한편으로 流出시켰으며 상자 내의 온도는 實驗을 통하여 20~45℃로 하였다.

煙氣는 상자 높이 3/4의 위치에서 길이 1m의 수직 금속관을 利用하고 직접 또는 外部 회석실을 통하여 Royco社의 粒子計數器로 빼내었다.

計數器는 좁은 通路內를 흐르는 煙氣粒子의 90° 散亂光을 펄스電流로 變化하여 펄스高에 따라 0.3~10nm 以下の 粒子를 對數 눈금으로 대개 같은 간격으로 되도록 15의 粒徑群으로 나누어 粒子數를 세었다. 이와 같은 測定 裝置로서 펄스高  $i_p$ 와 粒子 半徑

$r$ 의 關係는 K를 裝置 定數로 하면 다음과 같이 된다.

$$r = K \cdot i_p^{1/2}$$

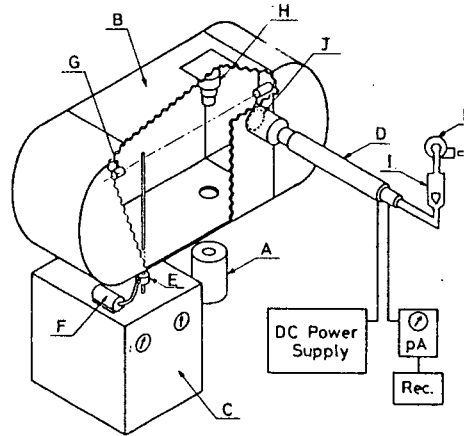


Fig. 3 Apparatus for particle size measurement.

A: electric furnace, B: smoke chamber, C: particle counter for visible smoke, D: ion mobility counter, E: outer dilution chamber, F: pump, G: smoke density meter, H: head for combustion products analyser, I: air flow meter, and J: radioisotope

測定 粒徑은 粒子의 屈折率로 다소 차이 일어나나 물 및 煤煙粒子에 대한 90° 方散亂光 強度의 計算 結果<sup>32)</sup>에서 무시할 수 있는 것으로 했다. 또 實測 吸引量에서 測可能 累積計數值 上限은 1,200/s (補正 6,000/s)이어서<sup>33)</sup> 測定은 이 값 이하를 확인해 가면서 實施하였다.

煙氣의 濃度는 吸引點과 같은 높이에 光 過率計 및 Cerberus社의 RMG-2型 燃焼成物 測定器의 헤드를 設置하여 測定하고 果는 각각 減光係數  $\sigma$  및 測定器 指示值 V로 計算하였다.

#### 3.2. 測定 結果

##### 3.2.1. 샘플링系의 影響

우선 실내에 떠있는 먼지를 測定한 稀釋倍率이 增加함에 따라 最大徑이 減少하였으므로 회석 공기를 포함한 總吸引量은

능한 적게 440 cm/min으로 하고 計數器 內藏의 회석 장치는 10倍로 하였다.

다음에 길이 1 m의 여러가지 직경의 吸引管을 이용하여 測定한 結果, 管을 대면 다소 採取效率이 低下하고 또 관을 수직에서 경사지게 하면 0.5 μm 이상의 粒子數가 감소하였기 때문에 吸引管은 內徑 10 mm의 수직 흡입 管으로 하였다.

3.2.2. 稀釋倍率 10倍로 測定한 경우

이節과 다음 節의 測定에는 각 粒徑마다 6초간씩 測定하였다. 그러므로 全測定範圍를 측정하였을 때 1分 以上이 所要되었다. 이와 같은 方法의 測定 結果는 그림 4의 代表例에 나타난 바와 같이 縱軸에 粒徑, 橫軸에 時間을 나타내는 圖表에 相對粒子個數濃度의 等值線을 標示하였다. 이들 도표에서 注目할 것은 煙氣의 濃度 增加에 따라 最大徑이 增加하는 것이며 發煙이 識別되기 直前에 0.3 μm 以內의 室內 浮遊 粒子가 감소 한다는 것이다. 또한 여과지를 一定 溫度 上昇率로 서서히 가열한 경우 50 ℃를 초과하여 160 ℃에 달하는 사이 0.3 ~ 0.9 μm의 粒子가 漸增하고 이후 250 ℃로 될 때까지는 粒子가 감소한 것 같다.

한편 粒徑 分布는 그 中心의 粒徑 및 그 分布를 어떤 종류의 分布 函數 f(d)로 표시하면 便利하며 그 代表的인 것으로는 正規 分布式, 對數正規 分布式, Junge의 式<sup>34)</sup> 등을 열거할 수 있다. \* foot wrote

\*) 正規 分布式  $f(d) = \frac{\sum N}{\sigma_a \sqrt{2\pi}} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left( \frac{D-D_a}{\sigma_a} \right)^2 \right\}$

對數正規 分布式

$$f(d) = \frac{\sum N}{\log \sigma_g \sqrt{2\pi}} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left( \frac{\log D - \log D_g}{\log \sigma_g} \right)^2 \right\}$$

Junge 式  $f(d) = C / D^4$

上記에서 f(d)는 어떤 粒徑 D의 個數, D<sub>a</sub>는 算術平均徑, D<sub>g</sub>는 幾何平均徑, σ<sub>a</sub>는 標

準偏差, σ<sub>g</sub>는 幾何標準偏差, C는 常數, N는 個數이다.

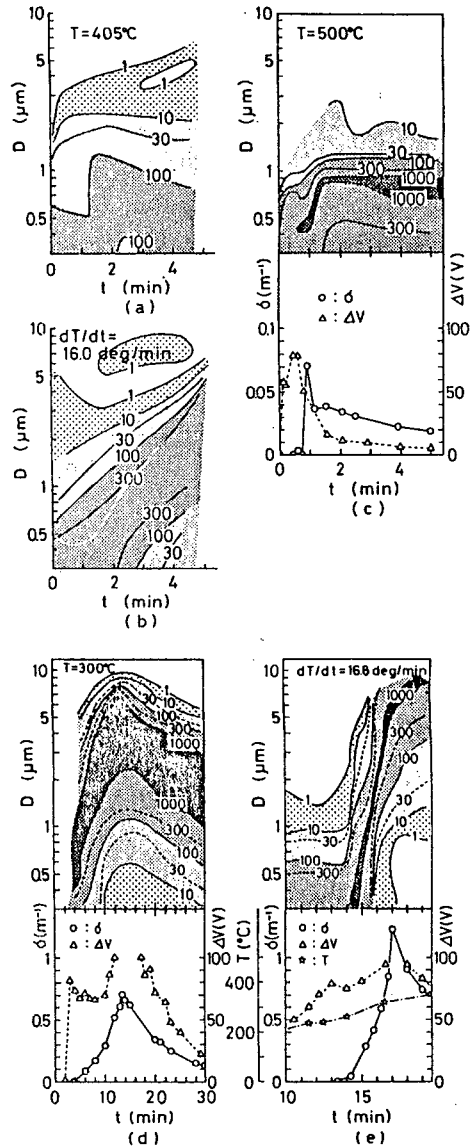


Fig. 4 Time variation of size distribution of filter paper smoke measured with light scattering-type particle counter (Dilution ratio : 10)

The relative number concentration of each particle size is shown by contour and shadings. (a) and (b) : opened a side wall of chamber. (c), (d) and (e) : Shuttled closely.

σ indicates smoke density expressed in term of extinction coefficient for natural logarithm per meter, and ΔV indicates the output of combustion products analyser. Same symbols used throughout all figures.

이제 全測定 範圍에 걸쳐서 測定하는 동안 粒徑이 변하지 않는다고 하면 그림 5에 나타난 것과 같은 粒徑 分布가 된다. 이와 같은 分布는 發煙 初期에는 粒徑의 4 乘에 粒子 個數가 거의 逆비례하고 그후 煙氣의 增加 段階에는 正規 또는 對數 正規 分布에 近似하며 감쇄 단계에는 對數 正規 分布에 近似함을 알 수 있다. 이 때 그림 6에 나타나는 바와 같이 中央徑  $D_m$ 은 煙氣의 濃도에 따라 變하고 또 對數 正規 分布에 近似하다고 하면 幾何 標準 偏差  $\sigma_g$ 는 평균 1.4가 되었다. 그림 7은 各 實驗에 있어서 中央徑의 最大值  $D_{mm} [\mu m]$ 과 煙氣 濃度の 最大值  $\sigma_m [m^{-1}]$ 의 關係를 나타내나 回歸直線은 다음 식과 같다.

$$\sigma_m = 0.11 D_{mm}^{1.2} \quad (5)$$

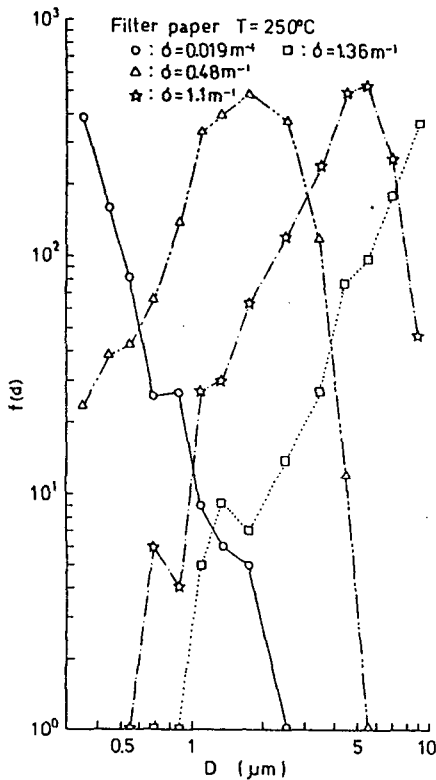


Fig. 5 Particle size distribution with smoke density

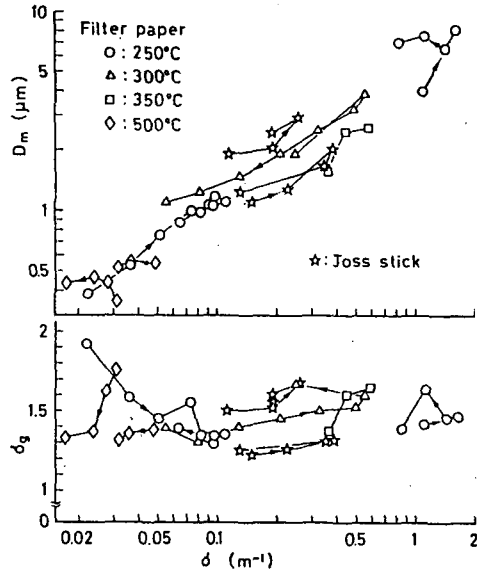


Fig. 6 Smoke density  $\sigma$  versus median diameter  $D_m$  and geometric standard deviation  $\sigma_g$

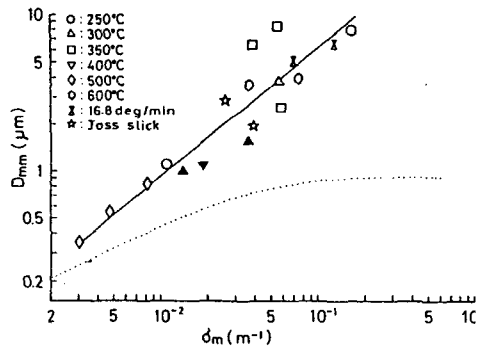


Fig. 7 Relation between maximum median diameter  $D_{mm}$  and maximum smoke density  $\sigma_m$   
Open symbol : filter paper as fuel, solid symbol : cedar.  
Dotted line shows the results obtained by cascade impactor method (Holmes, 1959)

### 3.2.3. 매우 큰 稀釋 倍率의 경우

앞節에서의 測定은 稀釋倍率이 一定하게 하여 粒徑 分布를 求하였으나 煙氣의 濃度 增加는 실직적으로 稀釋倍率이 低下함과 일치하고 있다. 그래서 稀釋에 의해 粒徑 分布가 변하지 않을 때까지 煙氣를 희석하여 計算하였다. 이 때문에 計數器 外部에 부착한 희석실 에 煙氣를 뽑아낸 후 1 cM當 10個 정도의 個

收濃도가 될 때까지 多量の 깨끗한 空氣로 희석하여, 즉 실제 計數器 内部에 10 倍로 희석하여 粒徑分布를 측정하였다. 또한 最終 稀釋 音率은 2,000 倍 以上으로 推定된다.

그림 8 은 濃도가  $0.1 \text{ m}^{-1}$  일 때 여러 가지 可燃物의 燃燒 煙氣 粒徑 分布 測定例를 나타내고 있으며 그림 9 는 煙氣의 濃도에 따른 粒徑 分布 變化 例를 나타내고 있다. 여기에서 분명히 나타난 바와 같이 測定된 煙氣의 最多徑이 대부분 計數器의 測定可能 最小粒徑의  $0.35 \mu\text{m}$  이었기 때문에 粒徑分布는 모두  $0.35 \mu\text{m}$  의 粒子數가 모든 可視 煙氣의 그의

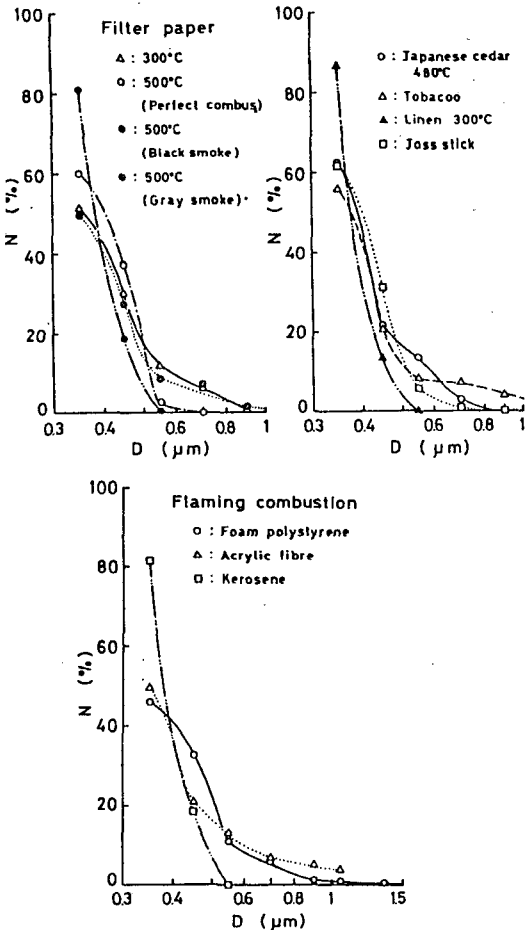


Fig. 8 Particle size distribution of various smoke with the extinction coefficient of  $0.1 \text{ m}^{-1}$  (Diluted by a large quantity of clean air)

에 대한 百分率  $P_{.35}$  로 나타내었다. 그림 10 은 여러 가지 煙氣의  $P_{.35}$  와 煙氣 濃度의 關係를 나타내나 이의 70% 以上の  $P_{.35}$  는 급격한 기울기가 되는 것을 의미하며 또 60% 以下の 것은 粒徑 4 乘의 個數 分布에 의해 完만함을 의미한다.

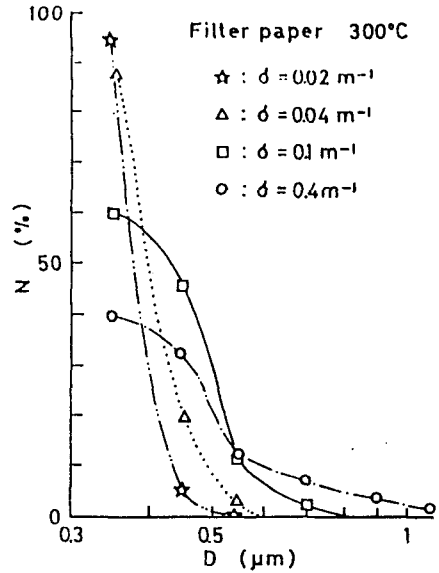
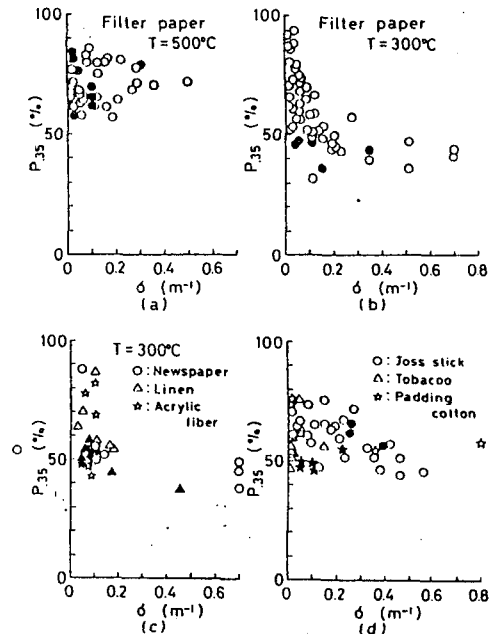


Fig. 9 Effect of smoke density to particle size distribution



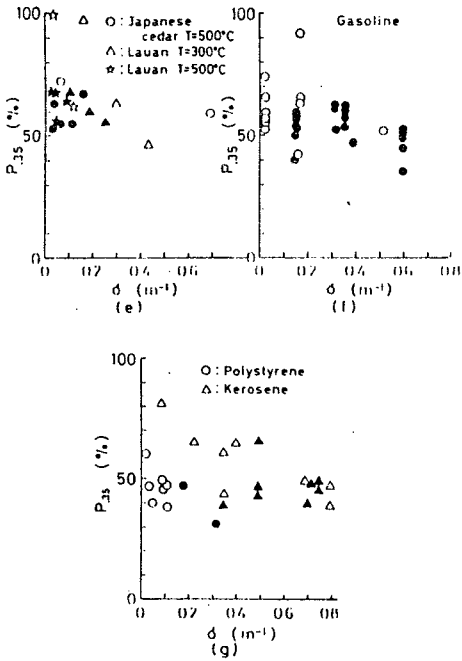


Fig. 10 Relation between smoke density and the percentage of the number of particles 0.35  $\mu\text{m}$  in diameter to total number of smoke particles - open symbols: the values for fresh smoke, solid symbols: those for aged smoke

3.3. 檢討

지금까지의 많은 研究者들은 煙氣 粒子의 最多徑이 0.1 ~ 1  $\mu\text{m}$  사이라고 하고 있다.<sup>35~37)</sup> 또한 最多徑이 차이가 나는 것은 煙氣 粒子 差異 以外에 샘플링 방법, 測定器의 分解 能力 등에 의해 差異가 있는 것으로 알려져 있다.

그림 7에 점선으로 표시한 曲線은 Holmes 에서 粒子의 質量으로부터 求한 粒徑의 稀釋에 의한 變化를<sup>24)</sup>, 희석되지 않을 때는 0.6 $\text{m}^{-1}$ 의 減光係數를 가지는 것으로 가정하여 計算한 結果이다. 研究팀의 結果와의 차이는 測定方法의 차이 특히 使用한 計數器의 光散亂 測定領域이 넓게하고 실효 희석배율을 低下시켰기 때문인 것으로 생각된다. \*foot wrote

\* 다른 測定者가 지적하고 있는 것<sup>38)</sup>과 같이 燃焼時 매우 많은 粒子가 發生하는 경우 작은 粒子에 의한 光 펄스가 하나의 펄스를 형성할 가능성이 있기 때문에 이후에는 레이

저 光線에 의한 光散亂 測定이 바람직하다.

어쨌든 3.2.1 및 그림 7에 나타난 바와 같이 稀釋倍率과 煙氣의 濃도가 測定 粒徑에 영향을 주는 것은 명확하다. 즉 다른 研究者도 그들의 研究結果에서 論議하고 있는<sup>7,39,40)</sup> 바와 같이 짙은 煙氣로 시간이 경과되거나 샘플링 시스템을 포함한 測定 過程에 의해서 粒子 신호 간에 凝集 기회가 많아지기 때문이다. 여기서 침강법에 의해 粒徑이 큰 값을 나타낸 것은 단순히 測定可能 下限의 制約 뿐이 아니고 無稀釋 煙氣를 吸引·測定하였기 때문에 凝集의 한 이유도 생각할 수 있을 것이다. 以上의 여러 가지를 고려해 볼 때 희석배율이 적은 경우의 煙氣 粒徑은 凝集 機會가 長時間 있었던 煙氣 또는 긴 복도등을 傳播하여 온 煙氣에 相當하는 것으로 推論할 수 있다. 이 때 실제의 建物에는 時間 經過나 傳播距離 등의 差에 의해 그림 7에 나타난 어느 曲線과 같이 되지 않을까 생각되나 凝集에 의한 粒徑의 증가와 함께 작은 粒子의 擴散, 큰 粒子의 沈降을 이르게 粒徑 分布는 매우 커져서 煙氣의 濃도에 따른 最大徑을 가지는 幾何的 標準偏差 1.4의 對數正規形에 近似할 것 같다. 이와 같은 煙氣의 個數濃도는 같은 濃도의 신선한 연기의 個數濃도보다 작은 것으로 생각되어 진다.

한편 3.2.3에 나타난 현저하게 희석된 煙氣의 粒徑은 凝集 粒子의 分離 또는 液滴의 蒸發에 의해 적은 눈금을 나타내고 있는지도 모르지만 0.3  $\mu\text{m}$  또는 그 이하에 最多徑을 가지는 分布는 다른 研究者가 샘플링을 하지 않고 空氣中에 浮遊하고 있는 상태로 測定한 粒徑<sup>11,12,23)</sup>과 一致하며 또한 10,000 배 정도의 희석배율로 측정된 粒徑과도 잘 일치하고 있다. 여기에서 研究팀은 매우 희석된 煙氣 粒子는 測定過程에서 凝集되기 어렵고 그 粒徑은 보통 방에 設置된 煙氣感知器가 作動하는 정도의 얇은 煙氣의 진짜 粒徑에 가깝다



1. 생각하였다. 이와 같은 비교적 初期 煙氣 一般的 傾向은 測定 結果 다음과 같이 要 할 수 있을 것 같다.

a) 얇은 섬유系 可燃物의 着炎 燃燒 煙氣는 粒徑 分布가 거의 一定하고 減光 係數의 增加는 個數濃度의 增加로 볼 수 있다. 이와 같은 傾向은 綿, 담배, 線香 등에서 서서히 發生하는 煙氣도 같으며 이는 粒子雲中에 粒子가 충분히 成長하기 때문인 것으로 생각되어 진다.

b) 섬유系 可燃物의 300℃ 燃燒 煙氣는 0.35 μm의 粒子數가 發煙直後에는 總數의 90% 이상을 점유하고 있으나 煙氣의 濃度나 時間의 經過와 함께 분산되어 最大 粒徑이 增加되는 것으로 생각된다. 燈油·플래스 킱과 같이 그을음이 많은 煙氣도 程度의 差異는 있으나 같은 傾向을 나타내고 있다. 이와 같은 煙氣 濃度의 增加는 個數濃度뿐 아니고 平均 減光斷面積의 增加에도 영향이 있으며 新鮮한 煙氣의 個數濃度는 같은 濃度의 오래 된 연기보다 個數濃도가 많은 것으로 생각되 거 진다.

c) 이번 測定에는 大部分이 비교적 얇은 木材에 대하여 實施하였으나 木材와 같이 거느 정도 容積이 있는 材料의 高溫 燃燒 煙氣에는 低溫 燃燒 煙氣가 混在되어 濃도가 時間과 함께 粒徑 分布가 變化된다는 점이 注目 된다.

4. 不可視 粒子의 粒徑 分布

이온化式 감지기는 可視 煙氣뿐 아니라 不可視 燃燒 生成物에 의해서도 作動하기 때문에 不可視 粒子의 粒徑 分布를 帶電 粒子의 電氣的 易動度를 測定하여 求하였다.

4.1. 測定 方法

煙氣의 發生 및 集煙 方法은 3.1에 의한 方法과 같이 하였고 易動度 計測器는 그림 3과 같이 하였다.

計測器는 그림 11과 같이 內部 電極을 둘로 分割한 同心圓筒 電極 構造이다. 그 原理 및 易動度 스펙트럼을 求하는 方法은 다른 文獻<sup>42~46)</sup>에 說明되어 있으나 간단히 說明하면 帶電 粒子를 포함한 氣流는 層類 狀態로 均一 電界의 電極間을 一定 流量으로 通한다.

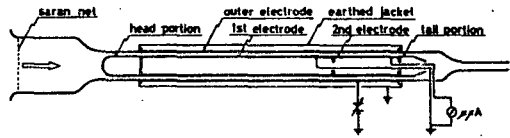


Fig. 11 Ion mobility counter  
inside diameter of outer electrode: 65.8mm  
outside diameter of inner electrode: 50.7mm  
length of first or second inner electrode: 450mm  
or 150mm, respectively

이 때 易動度가 큰 帶電 粒子는 모두 第1 電極으로, 어느 範圍 易動度의 것은 第2 電極으로 잡혀지며, 보다 작은 易動度 粒子는 計測器 外에 버려진다. 第2 電極에 잡혀지는 粒子의 易動度는 電極치수, 流量, 電極間 印加 電壓으로 정하나 本 實驗에는 넓은 範圍의 易動度를 가지는 粒子 分布를 알고 있기 때문에 圖 10에 나타난 바와 같이 주로 電壓 V를 단계적으로 9秒마다 變하는 외에 流量 φ를 변환하여 측정하였다. 한편 電壓 上限은 200 V이고 易動度를 對數的으로 19 分割하여 하나 걸러 易動度 범위를 測定하도록 分壓하고 檢査하여 다른 帶電 粒子가 측정되도록 逆極性의

Table. 1 Measuring conditions

Applied voltage (V)	Air flow (ℓ/min)	Measurable ion mobilities (cm/V sec)	Measurable particle dia (μm)
0.66-200	10	0.233-0.000953	3-50
0.66-200	3	0.0698-0.000286	5-100
0.66-200	1	0.0232-0.0000953	9-200

電壓을 전극으로 印加 가능하도록 하였다. 또 第 2 電極電流용의 微小電流計 (內部抵抗 1 MΩ)의 入力은 電壓 變換時에는 순간적으로 단락시키고 極性 變換時에는 20 초 이내의에 短絡시켰다.

測定되는 第 2 電極電流  $i_2$  에는 엄밀하게 말하면, 보다 작은 易動度 粒子의 一部가 기여하고 있는 외에 被測定 範圍 粒子의 一部는 第 1 電極에도 沾혀지고 있다. 그래서 各 易動度 마다의 이온數 密度는 앞에서 說明한 電壓 變換 周期 9 초 사이에 변하지 않아서 Whipple의 주장한 方法<sup>46)</sup>을 이용하여  $(\phi/V)$ 對 $(i_2/V)$ 의 特性曲線으로부터 求하였다.

지금 모든 粒子가 帶電하여 1nm의 粒子는 원형을 이루고 있다고 가정하면 그 易動度  $w$ 는 다음의 Stokes-Cunningham-Millikan式으로부터 求할 수 있다.

$$\omega = pe \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho}\right) \left(1 + \beta \frac{l_m}{r}\right) / 6\pi\eta r \quad (6)$$

위 式에서  $p$ 는 粒子의 素電荷 多重度,  $e$ 는 素電荷,  $\rho$  및  $\rho_a$ 는 各 煙氣粒子 및 空氣의 密度,  $\beta$ 는 Cunningham 定數,  $l_m$ 은 空氣分子의 平均 自由 行程,  $\eta$ 는 空氣의 粘性係數이다. 여기에서 2.3에서 說明한 바와 같이  $\rho$ 는 1,  $p$ 는 測定範圍內 1이라고 하면 易動度로부터 粒子 半徑  $r$ 가 決定되고 또 이 이온數 密度는 個數濃度로 볼 수 있다. 한편 不可視 粒子는 非帶電 粒子가 있는 것으로 豫測되었기 때문에 대부분의 測定時에는 計測器 吸引點에  $Am^{241}$  88  $\mu$  Ci를 分散하여  $\alpha$ 線 照射에 의한 공기 이온으로 非帶電 粒子를 帶電시키기로 하였다.

#### 4.2. 測定 結果

第 2 電極 電流에서 個個의 測定徑 $\pm 10\%$ 의 粒子 個數 濃度  $\Delta n$ 이 우선 算出 되었으나 지금 最小徑으로부터 最大徑까지 측정하는

데 필요한 1.5 분 사이에 粒徑 分布가 변하지 않는다고 하면 그림 12의 例와 같은 分布 曲線이 얻어진다.

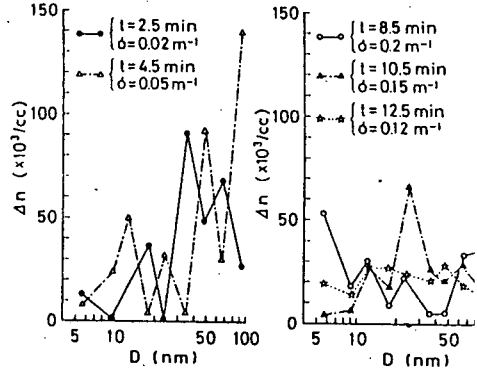


Fig. 12 Variation of number concentration (width  $\pm 10\%$  of the diameter)  $\Delta n$  with time  $t$  and smoke density  $\sigma$   
burning condition: filter paper 300°C  
open symbol: positive-charged particles  
solid symbols: negative-charged particles

따라서 이  $\Delta n$ 에서 일정한 폭(이하 1nm 마다 粒子 個數 濃度 分布  $f(d)$ 를 구하면 이 粒子의 個數 濃度는  $\Delta n$ 보다 줄어 들고 적고 1nm의 粒子는 상대적으로 증가한다. 어쨌든 그림 12와 같이 不可視 粒子數는 發煙時에는 초기의 감쇄시보다 多量으로 되고 통상 複數의 산이나 계곡을 가지고 있어 分布는 時間에 따라 변한다는 것을 알았다. 이 測定 結果는 표 2와 아래와 같이 要約할 수 있다.

a) 正帶電 粒子數 對 負帶電 粒子數比  $N_+/N_-$  測定은 1스캔마다 다른 符號의 帶電粒子에 대하여 實施하였으나 5~100 nm의 粒子 總 個數 濃度의 時間에 따른 변화에서  $N_+/N_-$ 의 평균치를 추정하면 RI를 計測器 入口에 붙이지 않는 경우 여파지 연소 초기는 1.1, 착염 연소 연기(黑煙)는 1.3로 外이었다. 표 2에는 RI를 설치한 경우의  $N_+/N_-$ 가 거의 모두이나 3~50nm의 粒徑 範圍 測定은 1보다 작고 5~100nm의 粒徑 範圍는 1보다 큰 경향을 나타내며 또한 연기의 초기에 종종  $N_+/N_-$ 는 매우 큰 값을 나타내었다.

Table. 2 Summary of results on invisible particles

Burning condition	Measured size (nm)	$\alpha$ -ray ionisation	No. burnt	$N_+/N_-$	$D_p$ (nm)	$D_d$ (nm)	$Z_i$ ( $\times 10^6/cc$ )	$\sigma_m$ ( $m^{-1}$ )	
Padding cotton 300 °C	3-50	○	2	0.59 0.68	5,12,34	(3),13,64	1.3 1.5	0.6 0.01	
	5-100	○	2	2.5*			2.6	0.79	
				1.62 1.04			2.9	0.12	
Joss stick	5-100	○	2	1.14 1.00	(5),13,18	48,(91),24	1.9 2.0	0.56 0.28	
Tobacco	5-100	○	1	1.13	(5),34,13	64,9,(5)	3.7	0.16	
Filter paper 300 °C	5-100	×	3	1.13 1.17	(5),9,13	64,(91),48	2.0-2.8	0.18-1.12	
	3-50	○	1	0.7	7,(3)	34,(3),48	2.1	2	
	5-100	○	4	aver 1.14	5,(91),13	34,(91),48	1.5-4.1	0.23-1.95	
Newspaper 300 °C	3-50	○	1	1.23	5,(3),13	24,18	0.6	0.18	
	5-100	○	1	0.76			2.7	1.04	
Linen 300 °C	3-50	○	2	0.94 0.78	(3),7,13	64,34,(3)	0.9 0.8	0.33 0.03	
	5-100	○	2	1.30 1.48			3.7 1.9	1 0.2	
Acrylic fibre 300 °C	3-50	○	1	0.94	5,34,24	9,13,(91)	1.0	0.19	
	5-100	○	1	1.74			4.4	0.12	
Lauan 300 °C	5-100	×	1	0.94	(5),9,13	34,64,(91)	2.0	0.33	
	5-100	○	1	0.76			2.1	0.99	
Filter paper 400 °C	5-100	○	3	aver 1.81	(5),18,13	34,64,9	0.5-2.8	0.012-0.84	
Filter paper 500 °C	Perfect combus.	3-50	○	1	2.2* 1.05	5,7,(3)	34,9,5	0.9	0.2
	Imperfect combus.	5-100	×	1	7.1* 1.35	7,9,18	34,9,(5)	2.5	0.31
		3-50	×	1	1.66	5,9,7	64,24,9	4	0.47
		5-100	○	3	aver 1.43			4.2-15.6	0.15-1.9
Linen 500 °C	3-50	○	1	0.62	(3),7,9	64,24,9	2.4	0.56	
	5-100		1	0.49			3.3	0.92	
Lauan 500 °C	5-100	×	1	1.94	(5),24	18,(91)	3.9	0.17	
Cedar 500 °C	5-100	○	1	1.87	(18),5	64,47	4.0	0.84	
Gasolene tray burning	3-50	×	1	1.55	10,(3),24	89,45,25	2.0	0.8	
	9-200	×	1	-			-	0.82	
	3-50	○	1	0.72	(3),10,24	89,24,(180)	2.6	0.78	
	9-200		1	1.56			12.2	0.8	
	5-100	○	3	aver 1.24	(5),13	34,47	4.9-7.7	0.8-0.86	

Notes

- $N_+/N_-$  : Ratio of number of positive-charged particles to that of negative-charged particles.
  - $D_p$  or  $D_d$  : Diameter, being apt to appear peak or dip on size distribution curves  $f(d)$ , shown in order of frequency.
  - $Z_i$  : Estimated total number concentration in region described in "Measured size"
  - $\sigma_m$  : Maximum extinction coefficient
- A circle or cross shows the presence or detachment of radioisotope, respectively, and a value obtained at the appearance of smoke is marked with an asterisks.

타내고 있다.

b) 구한  $\Delta n$  總和의 最大值는 RI의 有無에 따라 크게 변하고 있기 때문에 지금 非帶電 粒子는 없고,  $N_+/N_-$ 는 1이며 또 하나 걸러 측정을 생략한 粒徑 個數 濃度는 인접하는 粒徑과 같아서 표 2와 같이 不可視 粒子 總個數濃度의 最大值로 추정된다. 즉, 最大值는 5~1,000nm의 粒徑 範圍로 低溫 燃燒 煙氣는 약  $2 \times 10^6 / \text{cm}^3$ , 高溫 연소 연기는 약  $5 \times 10^6 / \text{cm}^3$  이어서 3~50nm 범위가 대부분이었다. 또 粒子 總個數濃度는 低溫 燃燒 煙氣는 대개 연기 농도에 따라 증감하고 最大 減光係數를 나타내는 點에서 최대치가 나타나고, 線香의 연기는 연기 농도에 관계없이 一定하며, 高溫 燃燒 煙氣는 發炎中에 큰 값을 나타내나 불꽃이 꺼지면 急減하였다. 한편 여과지를 高溫의 爐內에 연속 투입하면 第 2 電極 電流의 0점이 큰폭으로 변하는 현상이 보였으나 이와 같은 경우 앞의 값보다 큰 個數 濃度가 되었다고 생각되어 진다. 또한 單位 減光係數當 총 個數 濃度를 求하면 어느 연기에도 똑같이 發煙 初期에 最大值가 되고, 最大減光係數時 最小치가 된 후 연기가 없어지면 다시 증가하였다.

c) 不可視 粒子의 粒徑 分布를 알기 위해 前項과 같은 가정하에 縱軸에 粒徑, 橫軸에 時間을 나타낸 그래프에 正 또는 負帶電 粒子의 個數 濃度를 等值線 및 濃炎으로 整理하였다. 그림 13에 있어서 여과지의 高溫 燃燒를 나타낸 (a)만은 어느 粒徑  $\pm 10\%$ 의 個數 濃度  $\Delta n$ 를 표시하고 다른 것은 1nm幅의 個數 濃度 分布  $f(d)$ 로 표시 하였다. 이와 같은 그림에서 공통적으로 나타나는 不可視 粒子의 舉動은 다음과 같다.

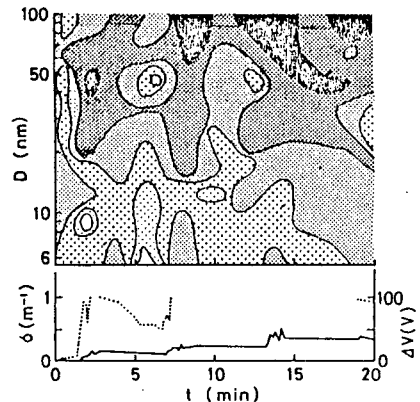
(1) 發煙 初期에는 비교적 다수의 粒子에서 단일 또는 2개의 산을 가지는 粒徑 分布가 되고,  $\Delta n$ 의 分布 산은 可視 粒子 쪽으로 급증하고 있다.

(2) 연기의 出現과 함께  $\Delta n$ 의 分布, 그 全域에 걸쳐 粒子數의 증가가 있고, 제하여 현저한 계곡의 出現은 연소 생성물 측정장치의 指示值  $\Delta V$  및 減光係數  $\sigma$ 의 미세한 접촉 관계를 가지는 것으로 생각되어진다.

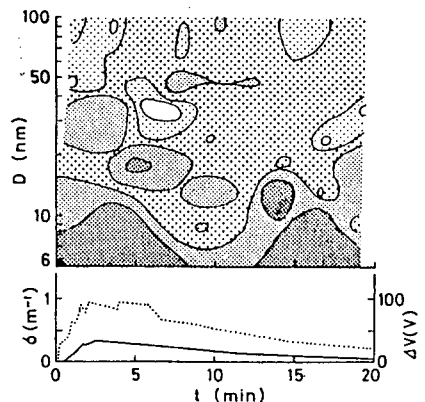
(3) 이후 연기의 농도가 증가할 때에 같은 패턴이 반복된다.

(4) 연기의 減衰時에는 일시적인 10r 以下の 粒子數 增加되었고 可視域 下限에 가까운 粒子가 100nm 이하에 감소하기 때문에 粒子증가가 나타났다.

(d) 個數 濃度 曲線  $f(d)$  위의 산과 계곡의 粒徑別 발생빈도는 표 2에 나타난 바와 같으며 線香의 경우는 그림 14에 나타내었다.



(a) Filter paper T=500°C;  $\Delta n$



(b) Lauan T=300°C; f(d)

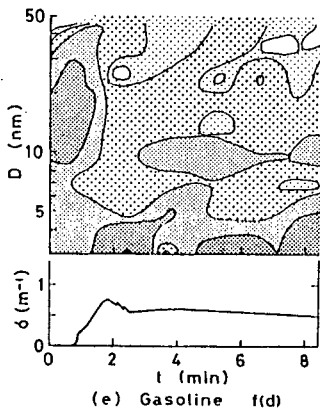
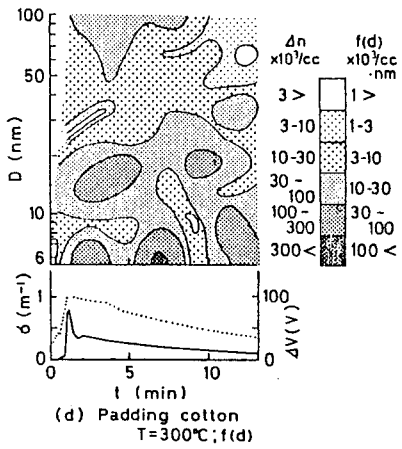
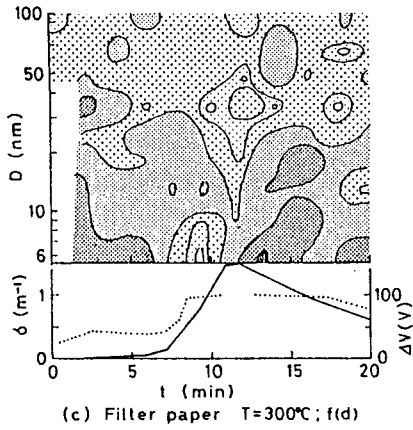


Fig. 13 Dynamic size spectrum  
The number concentration of positive- or negative-charged particles measured is shown by contour and shadings in the same figure.

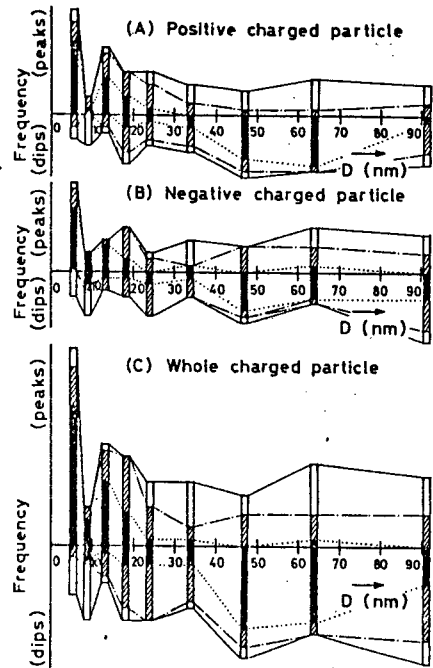


Fig. 14 Frequency of peaks and dips on size distribution curves  $f(d)$   
Solid, shaded and open area represent the frequency of the first, second and third peaks or dips, respectively.  
cornhustibles: Joss stick

### 4.3. 檢 討

이번 火災 初期를 염두에 두고 少量의 特定 가연물을 여러 조건에서 연소시켜, 그 연소 생성물을 비교적 좁은 공간에 축적하여 주로 100nm 이하의 粒徑 個數 濃度를 구하였다.

易動度 計測器를 이용하여 구한 粒徑은 stokes 徑에 상당하는 것이나 이와 같은 間接的 測定에는 算出上의 가정등 부수되는 문제도 당연히 많은 것으로 생각되어 진다. 예를 들면 측정 범위내에도 多重帶電粒子가 어느 확률로 존재할 것, 측정범위 上限 이상의 큰 粒子가 多重帶電에 의해 易動度を 증가시켜 측정 범위내에 들어오게 하는 가능성이 있을 것<sup>47)</sup>, RI 照射에 의한 粒子 生成등이 우선 誤差의 원인으로 생각할 수 있을 것이다. 앞의 두가지에 대하여는 電氣的으로 평정한

상황에는 이론적으로 補正할 수 있으나 연소 연기는 그와 같은 상황이 아니어서 이번에는 이온數 密度를 個數 濃度로 했기 때문에 60nm 이상의 個數 濃度を 크게 評價할 可能性이 있다. 그러나 이번에 선정된 20nm 이하에 많은 個數를 가지는 分布  $f(d)$ 는 같은 間接的方法이나 과포화 증기중에 연소 不可視 粒子を 生長시켜 측정된 최초의 보고<sup>49)</sup>와 일치하고 있다.

다음에 粒徑 分布를 算出하기 위해 약  $2_pA$ 의 測定 電流로부터 Whipple 이 提昌한 方法을 참고하여 그 特性 曲線에서 이온數 密度를 구하였기 때문에 9초의 측정간격으로 個數가 변하지 않은 것이 전제조건으로서 필요하다. 이에 대해 着炎時 燃燒時間은 짧고 연소 발생를 측정기의 指示值에서 不可視 粒子的 個數 및 粒徑이 급격히 변화하고 있는 것으로 예상되기 때문에, 着炎時의 과도적인 개수 농도를 구하기에는 이번 방법이 적절하지 않은것 같다. 100nm 이하 粒子的 급격한 生長은 다른 것도 지적되어 있어 이후 같은 原理를 이용하는 경우 第1 電極 電流를 동시에 측정하는 등의 方法 개선이 바람직하다.

이들 문제점을 고려하면서 이번 측정결과를 종합하면 다음과 같다.

a) 不可視 粒子的 個數 濃度は 초기에는 1 또는 2개의 산을 가지고 급속히 입자는 生長하고, 이후 線 스펙트럼에 가까운 복수의 산을 가지고 20nm 이하의 粒자가 많은 分布 曲線을 나타낸다. 산이 發生하기 쉬운 粒徑은 可燃物, 時間 경과에 따라 다르나 섬유系 可燃物은 低温 燃燒의 경우는 5 및 13nm에, 高温 燃燒는 10nm 이하에 發生하였다. 이와 같이 線스펙트럼에 가까운 산이 나타나는 것은 液滴의 경우 증기의 냉각에 따른 응축 속도가 粒徑에 따른 입자 표면 증발속도 보다 큰 粒徑이며 증기 성분이 다르기 때문에 粒徑

이 다르게 되는 것으로 추정된다.

b) 연소 생성물 粒자에 있어서 非帶電 粒자가 차지하는 비율은 La Mer 法에 의한 응축입자에 비하면 작고 담배 연기는 0~50%로 보고 되어 있다.<sup>24~26, 29)</sup> 이번에 RI 照射의 有無에 의한 그림을 확인하려고 하였으나 不可視 粒자는 可視 煙氣에 비해 不安定하고 再現性이 있는 測定이 不可能하고 표 2의 最大推定 個數濃度에서도 명확한 차이를 發見할 수 없었다. 이와 같이 帶電粒자가 많았으므로 연소 생성물 입자의 粒徑 增加는 단순한 충돌뿐이 아니고 電氣的 引力 및 斥力의 影響을 꽤 많이 받는 것으로 생각되어 졌다

c) 이번 측정된  $N_+/N_-$ 는 담배 연기 측정 결과로도 잘 일치한다. 發煙 初期에  $N_+/N_-$ 가 매우 큰 값을 나타내는 것이 종종 있었다는 것이 주목된다. 즉 이와 같은 單極粒子的 存在는 그 電氣的 斥力에서 다수의 不可視 粒子を 응집시키지 않고 과도적으로 공기중에 浮遊시켜 놓은 것으로 추측할 수 있다.

## 5. 燃燒 生成物の 粒徑 分布가 煙氣 感知器의 作動에 미치는 影響

### 5.1. 散亂光式 煙氣 感知器의 作動

火災에 따른 煙氣 濃度は 煙氣 粒자에 의한 光의 減衰를 利用하여 式 (1)에 나타나는 減光 係數, 單位 距離當 減光率 등으로 표시된다. 지금  $Q_{EXT}$ 를 減光 效率,  $r_v$ 를 평균 粒徑으로 하면 式(1)은 다음과 같이 할 수 있다.

$$F/F_0 = \exp(-\sigma\ell) = \exp(-\overline{C_{EXT}} Z_v \ell) = \exp(-Q_{EXT} \pi r_v^{-2} Z_v \ell) \quad (7)$$

한편 散亂光式 煙氣感知器의 光電素子에 들어 오는 단위 면적당 散亂光量  $I$ 는 入射 光束을  $I_0$ , 1個의 粒자에 의한 光電素子 方向에 散亂되는 光의 單位 立體角當 強度를  $J$ , 粒子부터 素子까지의 距離를  $d$ 로 하면 다음 式

- 같이 된다.

$$I = I_0 J Z_v / d^2 \quad (8)$$

式 (4)에서 J는 粒子 斷面積에 비례하는 量  
|므로 위 式에서 다음 式을 유도할 수 있다.

$$I = K \pi r_v^2 Z_v \quad (9)$$

散亂光式 煙氣 感知器의 黑煙에 대한 檢知  
|力은 같은 濃度 白煙의 1/4이라는 것은  
| 알려져 있다.<sup>9,19)</sup>

지금 白煙은 水滴, 黑煙은 그을음으로 하여  
|들에 상당하는 1.33-0j 및 1.95-0.66j  
| 굴절을 粒子에 대한 다른 研究者가 이론적  
|로 계산한 Q<sub>EXT</sub> 및 j를 표시하면<sup>50,11)</sup> 그  
| 15, 16과 같다. 그림 15는 0.65 μm이  
| 水滴의 Q<sub>EXT</sub>는 같은 粒徑의 그을음보다  
| 우 작게 나타나고 그림 16은 水滴의 減光  
| 散亂 以外에 吸取등 여러가지 원인이 있음  
|로 간단히 설명하기가 곤란하다.

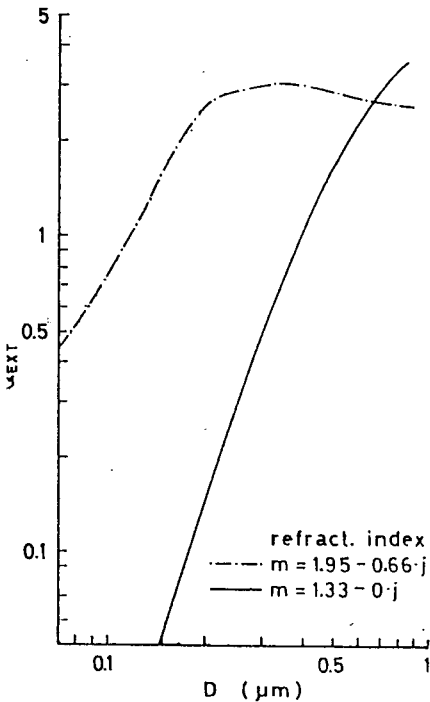


Fig. 15 Relation between efficiency factor for extinction  $Q_{EXT}$  and particle diameter ( $\lambda=0.546\mu m$ ), calculated by Houton et al. (1949) and Prüssmann (1967)

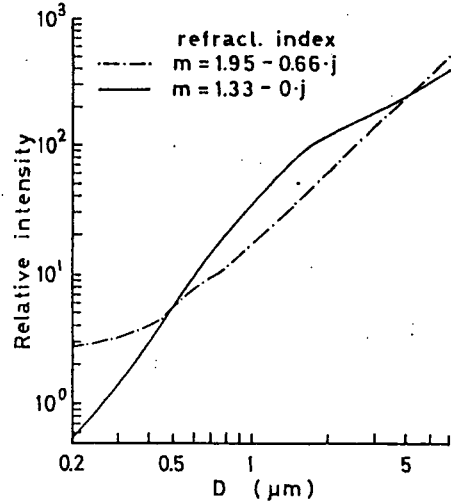


Fig. 16 Intensity of light scattered by single particle in direction between 75° and 115°

이번 一連의 粒徑 測定은 일반적인 室內에  
| 설치된 감지기의 작동을 검토할 경우 0.1 ~  
| 0.35 μm의 最多徑을 나타내는 것으로 생각  
| 하면 좋을것 같다. 이와 함께 앞에서 說明한  
| 感度差가 일어나는 理由를 검토해 보기로 한다.

지금 式(7) 및 (9)의 記號에 W 및 S를 白  
| 煙과 黑煙으로 하면 두式에서 같은 煙氣 濃度  
| 와 앞에서 말한 出力比를 加味하여 다음 관계  
| 를 얻을 수 있다.

$$Q_{EXTW} \overline{r_{vw}}^2 Z_{vw} = Q_{EXTS} \overline{r_{vs}}^2 Z_{vs}$$

$$\overline{r_{vw}}^2 Z_{vw} = 4 \overline{r_{vs}}^2 Z_{vs}$$

위의 두式에서

$$4 Q_{EXTW} = Q_{EXTS} \quad (10)$$

이와 같은 조건을 만족하는 白煙의 粒徑은  
| 그림 15에서 0.4 μm 이하가 되고 黑煙의 粒  
| 徑은 같은 個數 濃度の 경우 白煙의 半이던  
| 充分하게 된다. 그러나 그림 16에 나타나는  
| 것과 같이 0.5 μm 이하의 粒徑領域은 粒徑減  
| 少에 따른 散亂光 強度의 低下는 式(9)에 나  
| 타나는 바와 같이  $Q_{EXTS} / Q_{EXTW}$ 는 4 배  
| 보다 크게될 必要가 있다. 즉 앞에서 說明한  
| 感度差는 단순히 白煙의 粒子徑이 클 뿐아니고  
| 白煙의 個數濃度도 높게 되는 요인이라고 생

각된다. 또한 低温 燃焼 煙氣는 비교적 좁은 폭의 粒徑 分布를 나타내고 그을음보다 큰 平均徑을 가지는 것으로 3.3에서 說明한 바와 같다.

피난통로에 설치된 散亂光式 感知器가 일반적인 室內 감지기 보다 濃度의 연기에 작동되는 것으로 報告되어 있다.<sup>9)</sup> 0.6 μm보다 큰 粒子 煙氣는 그림 16 또는 式(7) 및 (9)에서 白煙·黑煙을 불문하고 연기의 농도에 따라 감지기 검출 능력을 가지는 것으로 생각되기 때문에 감도저하는 연기를 운반하는 氣流 速度의 저하에 의한 것으로 생각된다. 즉 이러한 종류 의 감지기는 外光의 影響을 방지하기 위해 檢知部는 연기가 들어가지 않도록 迷路로 되어있다.

5.2. 이온化式 感知器의 作動

a) 이제 單一 電離室에 燃焼 生成物이 들어간 경우 平常時  $i_0$  이었던 電離電流는 다음 式과 같이 生成物 粒子에 공기 이온이 부착하기 때문에 平均 粒子 半徑  $\bar{r}$ 와 個數 濃度  $Z$ 의 積에 따르며  $i$ 에 감소한다.\*foot work

$$i / i_0 = \exp(-CT \bar{r} Z) = \exp(-CT \sum r_n Z_n) \quad (11)$$

위 式에서  $C$ 는 공기 이온이 연소 生成物에 부착하는 비율을 나타내는 係數,  $T$ 는 극간을 공기 이온이 走行하는 時間이다.\*\*附註

\* 이제 공기 이온數 密度  $n$ 일 때 연소 生成物에 微小時間  $dt$ 에  $dn$ 을 감하면

$dn/dt = \beta n$ 이며 이를 해석하면  $n/n_0 = i/i_0 = \exp(-\beta T)$ 로 된다. 이온의 消滅常數  $\beta$ 는 氣象 分野의 附着 係數  $\eta$ 로 표시하면  $\beta = \eta Z$ 도 된다. Bricard에 따르면  $\eta = C_r$ 이고<sup>51)</sup>  $C$ 는 상수  $0.31 \text{ cm}^2/\text{s}$ 로 되어 있다.

\*\* 이온 走行 時間  $T$ 는 半徑  $R_1$  및  $R_2$ 의 同軸圓筒 電離室에서 다음 式과 같다.

$$T = \ell_0 (R_1 / R_2) \cdot (R^2 / R_2^2) / 2uV ;$$

$w$ 는 공기 이온의 易動度,  $V$ 는 印加 電壓이다.

실제 이온화식 감지기는 온도 등에 의한 電離 電流의 변동을 보상하기 위해 이제 하나의 電離室이 직렬로 접속되어 있고 앞에서 설명한 전리전류 감소를 等價 抵抗의 增加로서 補正용 전리실 양단의 電壓 增加에 의해 補正을 發한다.

b) 이러한 종류 의 감지기는 着炎 燃焼 煙氣에 예민하고 저온 연소 연기에 비교적 不감하며, 不可視 粒子의 差에 의해서도 설명되어 왔다.<sup>9,19)</sup> 이 점을 명확하게 하기 위해 이온화식 감지기 1組의 전리실을 측정 헤드에 하는 연소 生成物 측정기의 지시치  $\Delta V$ 는  $A_m^{24} 0.135 \mu C_i$ 를 붙인 단일同軸圓筒 電極 構造 管리실에 관한 전류 전리 감소도  $\Delta i / i_0$ 에 환산하였다. 한편 이 전리실의 外筒 電極直徑은  $2.5 \text{ cm}$ , 内部電極은  $0.25 \text{ cm}$ , 電極表는  $24 \text{ cm}$ , 또 印加電壓은  $7.5 \text{ V}$ 이고  $\Delta i / i_0$ 와  $\bar{r}Z$ 의 관계식 (11)에서 계산가능하다.<sup>53)</sup>

그림 17은 여과지  $500 \text{ }^\circ\text{C}$ 의 연소 연기의 測定 例에 있어서  $\Delta V$ 에 의해 산출한  $\bar{r}Z$  易動度 측정기에 의한  $5 \sim 100 \text{ nm}$ 의 不可視 粒子의 平均 粒徑  $\bar{r}_i$ 와 粒子 個數 濃度  $Z_i$ 의 積  $\bar{r}_i Z_i$ , 式 (7)에서  $\bar{r}_v = 0.1 \text{ nm}$ 로 가정하여 감광계수 실측치 및 그림 15에 표시하는  $Q_{EXT}$ 에서 얻은  $\bar{r}_v Z_v$ , 및  $(\bar{r}_i Z_i + \bar{r}_v Z_v)$ 의 시간적 變化를 나타내고 있다.

그림 18은 여과지  $300 \text{ }^\circ\text{C}$ 의 연소 연기 및 木材 연기의 測定例에서  $\Delta i / i_0$ 가 여러 가지의 값을 취했을 때  $\bar{r}_i Z_i$ 가 어느 정도이었던가를 나타낸다.

그림 (a)에  $\Delta$ 표로 표시하는 測定例는  $\bar{r}_v \approx 0.2 \mu\text{m}$ 로 가정하여 구한  $(\bar{r}_i Z_i + \bar{r}_v Z_v)$ 는 그림 17과 같고, 發煙 初期를 제외하고  $\Delta i / i_0$ 로 정하는  $\bar{r}Z$ 와 잘 일치하고 있다. 發煙 初期에 나타나는 兩者의 不一致



이유로서 非帶電 粒子의 존재나  $Z_i$ 의 不正確 度도 생각되어지나  $\bar{r}_v$ 를 일정하게 한 것이 타 당할 것으로 생각된다. 즉 發煙 初期에는  $\bar{r}_v$ 는 아직 작아서 앞에서 설명한 不一致를 적 계 할 수 있기 때문이다.

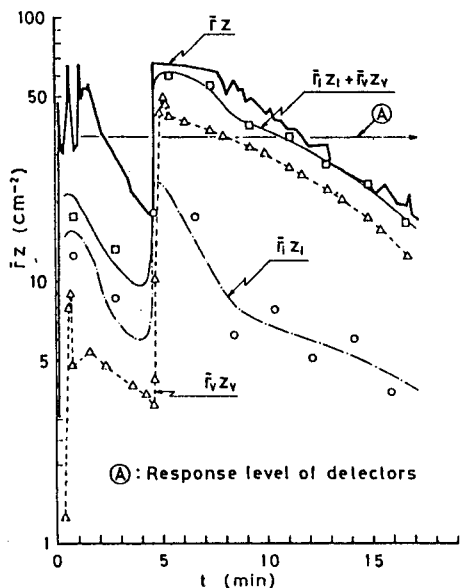


Fig. 17 Variation of  $\bar{r}Z$  with time  $t$   
 burning condition: filter paper - 500°C  
 $\bar{r}Z$ : Calculated from the value,  $\Delta V$  of combustion products analyser  
 $\bar{r}_i Z_i$ : Obtained by the measurement of invisible particles between 5 nm and 100 nm in diameter  
 $\bar{r}_v Z_v$ : Estimated from the value of smoke density, assuming  $\bar{r}_v = 0.1 \mu\text{m}$

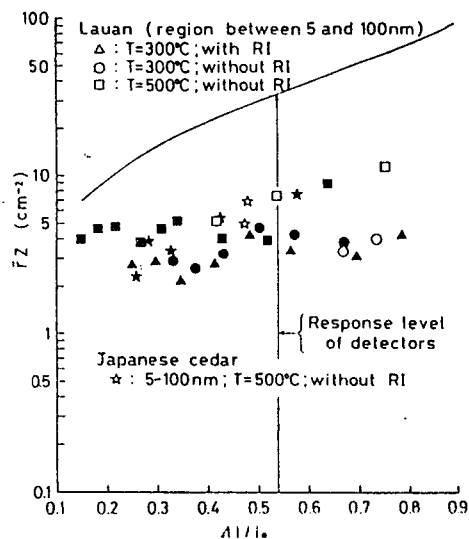
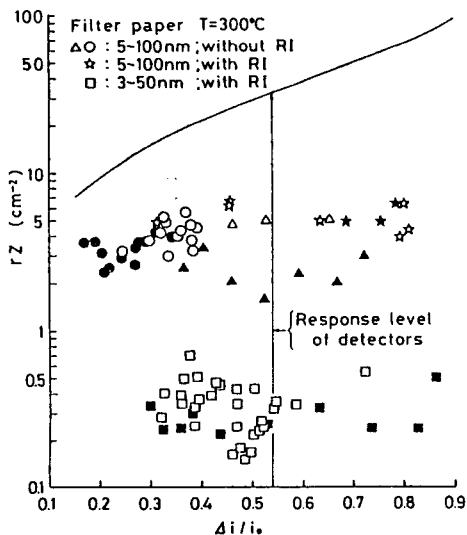


Fig. 18 Decrease of ionic current  $\Delta i/i_0$  and  $\bar{r}Z$  curve:  $\bar{r}Z$  calculated from  $\Delta i/i_0$ , open symbols:  $\bar{r}_i Z_i$  obtained by the measurement for fresh smoke, amkl, solid symbols:  $\bar{r}_i Z_i$  obtained by the measurement for aged smoke

그림 18에는 3~50nm의 粒子 半徑 個數 濃度積을 병행시켜 나타냈으나 個數 濃度가 粒徑 및 범위의 감소를 보정하는 정도 증가 하지 않기 때문에  $\bar{r}Z$ 에 그다지 기여하고 있지 않다. 着炎 燃燒의 경우에는 3~50nm의 個數濃度는 같은 경향을 나타내고 있어, 이 온화식 감지기의 작동에 기여하고 있는 不可視 粒子는 50nm 이상의 것으로 생각되어진다.

c) 이온화식 감지기의 檢知 出力과 연 기의 농도는 비례관계가 아니고 신선한 연 기가 노화된 연기와는 다르므로 루프모양 내지는 8자 모양의 곡선을 나타낸다고 보고 되어 있다.<sup>9,54)</sup> 그림 19는 그림 17의 결과를 재정리한 것이며 그다지 정확하지는 않으나 루프 모양의  $\bar{r}Z$ 와 감광계수의 관계를 나타 내고 있다. 도표에서 같은 연기의 농도라도 發煙時와 減衰時에는  $\bar{r}$  및  $Z$ 와 함께 다르 다는 것을 알았다.

그림 17 및 18에서 표준적인 이온화식 감지기가 작동하는 時點에 不可視 粒子가 전

리 전류의 감소에 기여하는 비율은 여과지의 신선한 연소연기는 20% 内外, 着炎 燃燒는 完全, 黑煙, 灰白煙은 40~100%이나 대개 평균해서 70% 정도이며 또한 이 중에서도 老化된 연기는 각각의 10% 내지 20% 내외이다. 남은 것은 可視 粒子에 의한 것일 것으로 추측된다.

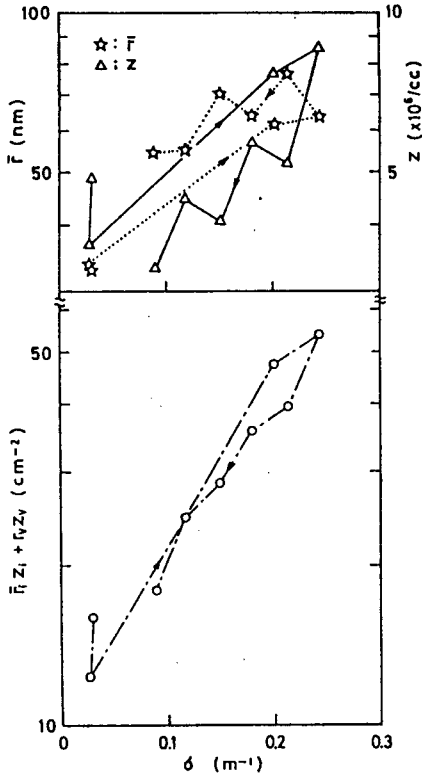


Fig. 19 Extinction coefficient  $\sigma$  versus mean radius  $r$ , total number concentration  $Z$  and their products  $rZ$  more than 5 nm in diameter (Rearrangement of Fig. 17)

d) 長時間 경과된 연기나 복도, 계단등 먼 거리를 이동한 연소 생성물에 대하여 이온화식 감지기가 작동하는 연기의 농도는 꽤 큰 것으로 보고되어 있다.<sup>9,52)</sup> 그 理由로서 앞에서 說明한 可視 粒子  $rZ$ 에 기여하는 비율의 저하뿐 아니고 可視 粒子도 동시에 저하하는 것으로 생각된다. 즉 可視 煙氣의 測定 結果로부터 이러한 종류의 最大徑 및 平均徑

이 증가하게 되고 式(7)에서 나타난 바와 같이 같은 濃度라도  $Z_v$ 는 急減하여  $r_v Z_v$ 의  $rZ$ 에 기여하는 비율을 저하시키는 것 같다

e) 이온화식 감지기가 저온연소 연기 및 木材의 着炎 燃燒 연기에 대하여 그다지 민감하지 않는 것도 정도의 차이는 있으나 d)의 같이  $r_i Z_i$ 가 적고  $r_v Z_v$ 의 감소되는 것으로부터 說明할 수 있을 것이다.

f) 이온화식이 着炎 직후에 과도적으로 큰 檢知 出力을 나타내는 것이 지금까지 報聞 되어 있으나<sup>3,9)</sup> 이는 4.3에서 說明한 바와 같이 같은 부호의 帶電 粒子雲의 존재를 알므로해서 理解되고 單極 粒子의 存在는 外圍 電極이 +인 감지기와 -인 감지기에 있어서 作動한 때의 연기 농도가 종종 다른 이유도 이와 같을 것으로 생각된다.

이와 같은 과도적인 粒子雲에 의한 誤報가 작은 방에서 자주 發生하여 연소 생성물 측정기에 의한  $\Delta V$ 의 측정이 실시되고 있다. 이제 측정기의 헤드가 7초의 時定數를 가지는 單一의 CR 時定數 回路로 가정하여 감지기 주

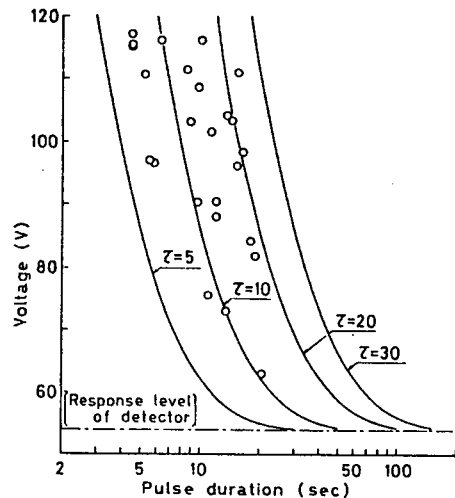


Fig. 20 Transient increase of detecting output of combustion products analyser replaced with pulse circles: values observed in actual small rooms curves: threshold value which can protect from false alarm by the addition of electric time-delay circuit with time constant  $\tau$ (s)

에  $\Delta V$ 의 진짜 값과 계속시간을 구하면 測直는 그림 20에 0 포로 표시한 펄스 현상으로 置換 가능하다.

그림에는 대표적인 감도의 이온화식 감지기 관하여 과도적인 出力 增加에 의한 誤報를 하지 않도록 지연회로의 時定數를 나타내고으나 20초 정도의 時定數를 가지도록 하는 이 가능하다면 대부분의 이온화식 감지기 報를 예방할 수 있을 것 같다.

以上으로 可視粒子는  $0.4 \mu m$  이하의 粒徑로 생각하면 일반적인 室內에 설치된 감지의 作動을 잘 설명할 수 있고 또 不可視粒의 測定 結果도 이온화식 감지기의 作動을 설명할 수 있을 것 같다.

이번에 測定되지 않았던  $0.1 \sim 0.3 \mu m$ 의 子와 過度的인 不可視 粒子의 舉動이 장차 려진다면 煙氣感知器의 作動을 보다 잘 說할 수 있을 것으로 생각한다.

引 用 文 獻

- 1) A. Muller : VFDB Zeitschrift 158 (1966)
- 2) H. Luck, R. Porscht : VFDB Zeitschrift 17 37 (1968)
- 3) P. Dubivsy : Report on research program of combustion products detectors, Underwriters' Laboratories, Inc., File RA-91 (May 1968)
- 4) M.J. O'Dogherty, R.A. Young and A. Lange: Fire Research Note No. 686 (1968)
- 5) M.J. O'Dogherty, R.A. Young and A. Lange: Fire Research Note No. 780 (1969)
- 6) M.J. O'Dogherty: Fire Research Note No. 793 (1969)
- 7) E.F. O'Sullivan, R.L. Sumner, B.K. Ghosh and P.G. Smith: Fire Research Note No. 1973
- 8) 渡邊彰夫, 古戶義雄: 照明學會火災報知委. 報資 410 (1967)
- 9) 渡邊彰夫, 竹元昭夫: 日本火災學會論文集 21 39 (1972)
- 10) A. Scheidweiler : Staub-Reinhalt. Luft 32 447 (1972)
- 11) A. Prüssmann : Forschungsberichte des Landes Nordrhein-Westfalen No. 1801 (1967)
- 12) R. Portscht : Staub-Reinhalt. Luft 32 7 1 (1972)
- 13) D. Hasenclever, H. Chr. Siegmann: Staub 20 212 (1960)
- 14) W. Coenen : Staub 23 119 (1963)
- 15) W. Coenen : Staub 24 350 (1964)
- 16) V. Mohnen, H. Chr. Siegmann : Staub 24 256 (1964)
- 17) J.P. Hosemann: Über Verfahren zur Bestimmung der Korngrößenverteilung hochkonzentrierter Polydispersionen von dielektrischen Mie Partkeln, Doctor thesis (1970)
- 18) J.P. Hosemann: Tagungsbericht zum 6. intern. Vortragsseminar über Probleme der automatischen Brandentdeckung p. 239 (1972)
- 19) Underwriters' Laboratories, Inc.: Standard for Smoke detectors, UL 168 (1968)
- 20) Underwriters' Laboratories, Inc.: The requirements for combustion products type detectors (1971)
- 21) Prüfmethode für automatische Brandmeldeanlagen : INET Technische Hochschule Aachen (1969)

- 22) 火災報知設備에 관한 技術의 規格을 定하는 省令 : 自治省令第 4 號 (1969)
- 23) W.W. Foster : Brit. J. Appl. Phys. 10 416 (1959)
- 24) J.C. Holmes, J.E. Hardcastle : Tob. Sci. 111 148 (1959)
- 25) 能登久 : 應物 3 283 (1934)
- 26) 佐野, 熊谷, 阪田 : 日本化學雜誌 74 664 (1953)
- 27) H.S. Patterson, R. Whytlaw-Gray : Proc. Roy. Soc. London A 113 302 (1926)
- 28) T. Jin : Report of Fire Research Institute of Japan No. 33 31 (1971)
- 29) J.M. Dalla Valle, C. Orr, Jr. and B.L. Hinkle : Brit. J. Appl. Phys. Suppl. 3 198 (1954)
- 30) J. Bricard : Geofis. Pur. Appl. 51 237 (1962)
- 31) G.T. O'Konski, G.T. Doyle : Anal. Chem 27 694 (1955)
- 32) H. Quenzel : Appl. Optics 8 165 (1969)
- 33) J.F. Pisan, G.H. Thomson : J. Phys. E Sci. Instrum. 4 359 (1971)
- 34) C. Junge : J. Meteorology 12 13 (1955)
- 35) 伊澤正夫 : 담배연기에 관한 綜說 : 日本專賣公社 (1961)
- 36) H.L. Green, W.R. Lane : Particulate clouds : E. & F.N. Spon Ltd (New Fetter Lane) 1964
- 37) G. Purst : 4. Internationale Brandschutz Seminar (Zurich), Thema 1 p 85 (1973)
- 38) 鈴木弘昭 : 有機材料의 火災性狀의 解析과 그 特性化, 東京理科學大學學位論文 (1971)
- 39) 神忠久 : 日本建築學會論文報告集 No. 204 47 (1973)
- 40) J.P. Stone, R.N. Hazlett, J.E. Johnson and H.W. Carhart : J. of Fire and Flammability 4 42 (1973)
- 41) 齊藤文春 : 昭和 45 年度燃燒性委員會報告書, 第 1 章, 日本科學防火協會 (1971)
- 42) H. Israel : Gerland Beitr. Geophys. 31 173 (1931)
- 43) M. Misaki : Pap. Met. Geophys., Tokyo 1 313 (1950)
- 44) M. Misaki : Pap. Met. Geophys., Tokyo 11 348 (1960)
- 45) M. Misaki : Pap. Met. Geophys., Tokyo 12 247 & 261 (1961)
- 46) E.C. Whiple, Jr. : J. Geophys. Res. 65 3679 (1960)
- 47) M. Misaki : J. Geophys. Res. 65 3309 (1964)
- 48) C. Yunge : Air chemistry and radioactivity. International Geophysics series, Vol. 4, Academic Press (New York) 1963
- 49) F.W. Van Luik, Jr. : The 77th NFPA Annual Meeting. Fire Research session (1973)
- 50) H.G. Houton, W.R. Chalker : JOSA 39 955 (1949)
- 51) J. Bricard : J. Geophys. Res. 54 39 (1949)
- 52) E. Meili : Bulletin of the Swiss Electrotechnical Association, 43 (No. 23) 1952
- 53) A. Scheidweiler : Private communication on ionisation chamber for aerosol measurement (May 1970)
- 54) V. Aschoff, J.P. Hosemann : Private communication on the smoke detector test (May 1970)