

# 자동차 실내 공기청정 기술

황 정 호  
연세대학교 기계공학파  
부 교 수

## 1. 머리말

산업혁명 이후 발전해온 인간 문명은 단순한 생산의 단계에서 편안함과 안락함을 추구하는 단계로 옮겨가고 있다. 이러한 추세에 더불어 차 내부에서의 편안함은 차체 진동이 제어된 승차감에 추가하여 공기 유동 제어를 통한 안락함까지 요구되고 있다. 또한 소비자의 구미가 고급화될수록 차 내부에서의 승차감과 안락함은 차를 선정함에 있어 주요한 변수로 떠오르고 있고 자동차 업계가 공략할 수 있는 틈새의 분야로 부각되고 있다. 차 내부에서의 공기 조화 제어는 탑승객의 안락함뿐만 아니라 기존의 에어 필터에서 포집되지 않은 미세 입자들에 의해 신체적인 유해성 요인이 존재할 수 있다. 미세 입자는 차 내부에서 장기간 체류될 수 있고 탑승객의 호흡시 폐포에 쉽게 유입되어 암을 유발할 수 있으며 도로에 잔재하고 있는 자동차의 배기가스에 포함되어 있는 PM (Particulate Matter : 입자상 물질)이나 타이어 마모에 의해 발생하는 입자들이 차 내부로 들

어올 경우 물체 표면에 쉽게 흡착되어 섬유를 더럽히거나 차체 내구성에 치명적인 영향을 미칠 수 있다. 또한 가로수에서 발생하는 꽃가루 등이 들어올 경우 알레기를 동반할 수 있다. 이처럼 차 내부로 유입되는 오염 입자들에 의해 건강상의 문제가 발생할 수 있고, 운전자의 기분을 악화시켜 사고를 유발할 수 있다. 인간의 호흡기관에 쌓이는 먼지의 위치는 크기에 따라 쌓이는 위치가 각각 다르며 이것은 인간의 건강과 밀접한 관계가 있다. 크기가  $2 \mu\text{m}$  보다 큰 먼지들은 호흡기관 상부에 쌓이며 이것들은 운전자와 승객들의 불쾌지수를 높이며 알레르기 반응을 일으키고 더 나아가 건조열, 천식 등으로 호흡을 방해하고 고통을 준다. 먼지크기가  $2 \mu\text{m}$  보다 작은 입자들은 호흡기관 하부와 폐에 침전되며 이러한 먼지들은 일상적인 대기상태에서 쉽게 볼 수 있는 먼지입자들이다. 또한 폐에 쌓이는 것을 볼 때 작은 먼지일수록 인체에는 치명적인 것을 알 수 있다. 이렇게 우리가 호흡하는 대기 속의 먼지들은 공해물질로서 검댕이(soot), 디젤분진, 공업지

대에서 발생하는 먼지, 미세한 분진, 박테리아, 세균, 곰팡이류 등이며, 특히 이중에서 검댕이(soot)는 연소과정에서 발생되며 2  $\mu\text{m}$ 이하의 미세한 먼지 입자들 중에서 80%를 점유하고 있고 0.2  $\mu\text{m}$  정도의 크기를 나타낸다. 운전 중 도로상에서 운전자들에게 쉽게 노출되어지는 것은 검댕이(soot)와 디젤 배기 먼지 입자들이

며 이러한 미세 먼지 입자들이 폐에 쌓이게 된다. 이러한 악조건의 대기상태에서 운전자 및 승객들을 자동차 운행 중 최적의 조건에서 운행하게 하는 것이 필터(Filter)의 근본적인 기능이다. 그림 1은 도심에서 주행한 차량의 필터에서 포집된 입자상의 물질을 보여주고 있다.

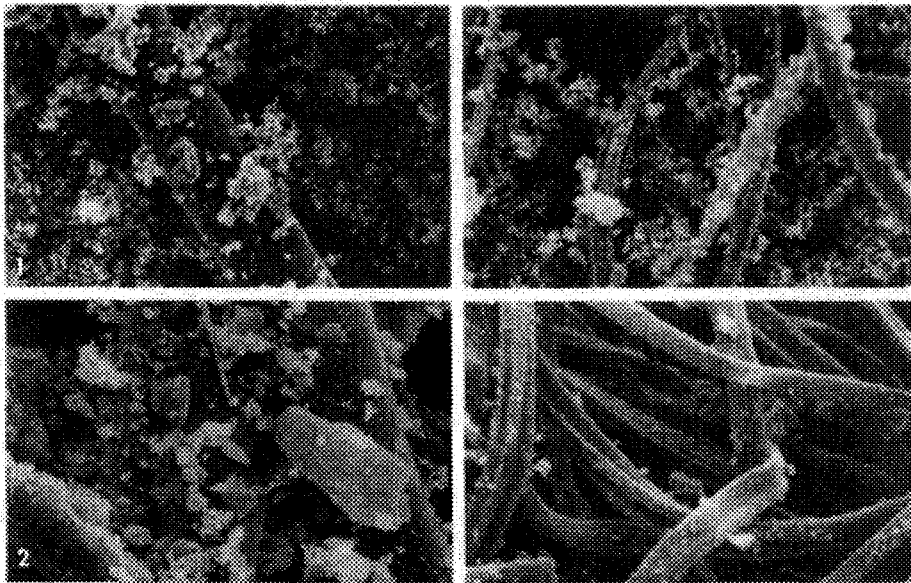


그림 1 필터에 포집된 입자상의 물질

지금까지는 미세입자 문제를 인간의 건강 측면에서 논하였다. 비단 건강상의 문제 뿐 아니라 미세입자제어는 차량의 성능 및 수명에도 큰 영향을 미친다. 미래형 자동차는 단순한 이동수단에 그치지 않고 스스로 생각하고 움직이며 사고를 예방하는 지능형 고안전 자동차이

다. 즉 지능형 충돌 회피시스템, 자동순항 시스템과 같은 안전을 위한 첨단기술이 적용된다. 레이더와 카메라가 자동차의 주행상태를 탐지하고 이를 바탕으로 위험정도가 판단되어 전자 제어 장치가 자동차를 자동으로 가속 및 감속한다. 충돌 위험시에는 위험을 알리는 경보와

자동 급제동으로 사고를 막고, 필요한 경우 차선을 변경하여 충돌을 회피한다. 따라서 이러한 전자제어 장치의 오작동은 단순히 차량 성능에만 영향을 미치는 것이 아니라 인간의 생명을 빼앗아 갈 수 있는 중요한 문제이다. 미세 입자들은 이들 전자제어장치의 센서부분을 오염시킬 수 있으므로 입자제어는 매우 중요하다.

이와 같이 차내로 유입되는 미세 입자들은 인간의 건강과 차의 성능/수명 등에 큰 영향을 미친다. 그러나 이러한 차 내부에서의 미세 입자 유입에 관한 제어는 한국을 포함해 전 세계적으로 연구가 미미한 상황이라고 볼 수 있다. 앞으로 환경 문제를 포함한 공기 조화 분야와 입자제어는 위에서 열거한 이유 등으로 자동차

업계 뿐만 아니라 학계에서도 깊은 관심을 보여야 할 분야이다.

## 2. 현재의 공기청정 기술: Cabin Air Filter

자동차의 운전자 및 승객의 건강보호와 쾌적한 차내 환경을 유지하기 위하여 정화된 공기를 차내로 유입시키는 캐빈에어필터의 개발이 오래전부터 연구되어 왔다. 고급 차종에는 예전부터 이를 장착하여 왔으며, 최근에는 소형 자동차에도 장착하기 위한 연구가 수행되고 있다.<sup>(1)</sup> 캐빈에어필터들은 주로 미립자상 먼지를 포집 제거하는데 사용되는 입자상 물질(PM) 제거용 필터 (Particulate filter)를 대부분이 사용되어 왔으나, 최근에 와서는 승용차로 유입되는 악취까지 동시에 제거하기 위한 연구가

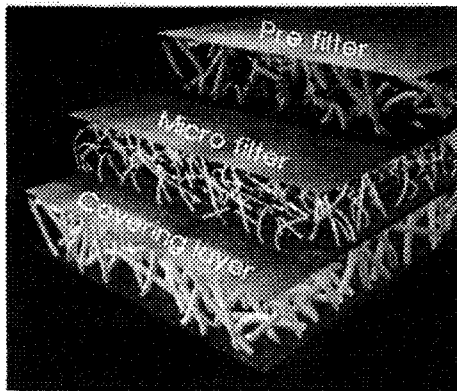


그림 2 Cabin Filter 의 구조

수행되고 있다.<sup>(2)</sup>

캐빈필터는 그림 2와 같이 3개의 필터들로 구성되어 있으며, 이들은 각각 0.5  $\mu\text{m}$  크기의 입자를 포집할 수 있는 프리 필터(pre filter),

0.3  $\mu\text{m}$  크기의 입자를 포집할 수 있는 마이크로 필터, 그리고 필터를 보호해주는 커버링 필터이다. 그림 3에서와 같이 주로 차량의 앞부분에 장착되고 있다. 프리 필터는 폴리프로필

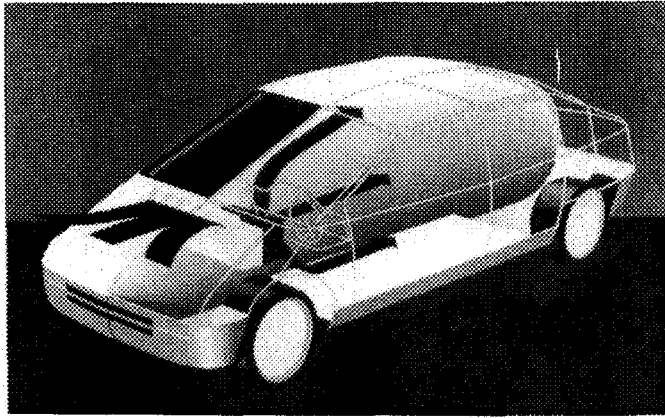


그림 3 차량의 내부로 유입되는 공기의 경로

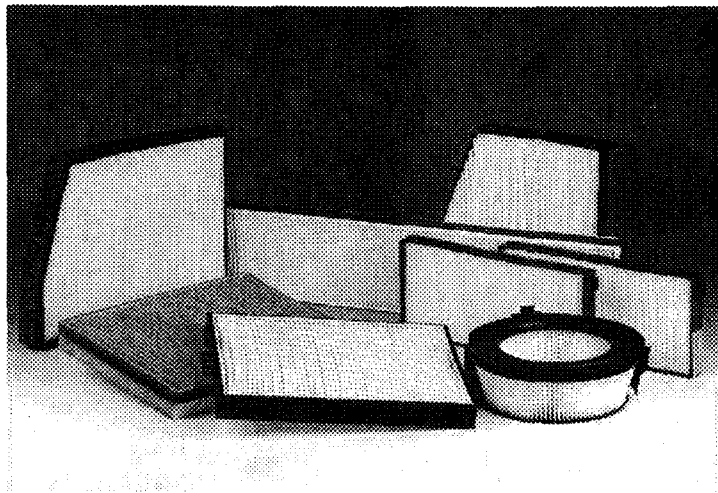


그림 4 Cabin Filter 의 종류

렌 또는 폴리카보나이트 섬유로 만들어진 울이 굵은 짜여지지 않은 형태이고, 두 번째 층도 마찬가지로 폴리프로필렌 또는 폴리카보나이트 섬유를 사용한다. 악취제거까지 겸한 캐빈필터의 세 번째 층은 정전 필터(electret filter)를

사용한다. 이를 위해서는 활성탄소입자(activated carbon granular)를 코팅하는 방법과 활성탄섬유(activated carbon fiber)를 사용하는 방법이 있다.

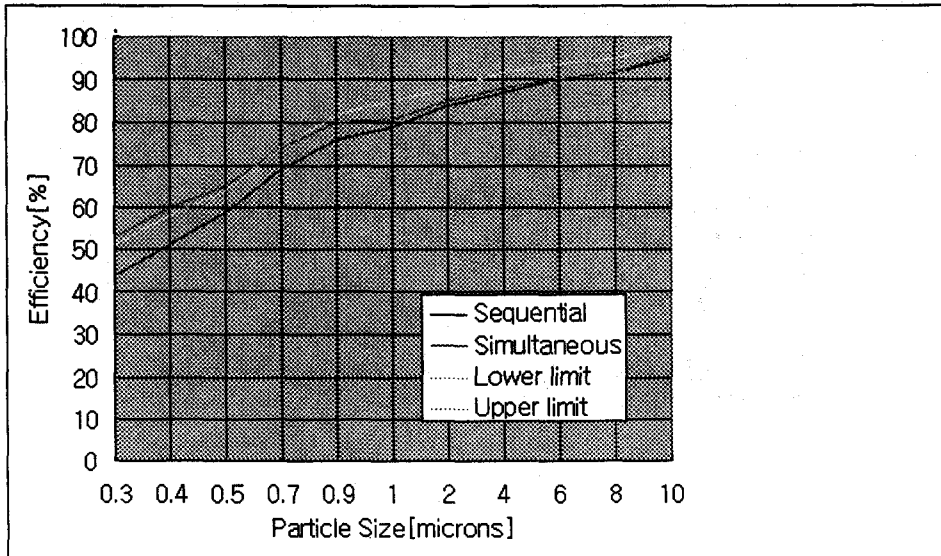


그림 5 차량의 내부로 유입되는 공기의 경로

### 3. 미래의 공기 청정 기술 (전기적 장치 + 캐빈 에어 필터)

캐빈 필터는 압력 손실이 3~5% 정도로 차압이 거의 없으나 차량의 속도에 대한 필터의 포집 효율은 높지 않다. 또한 이러한 필터는 차량이 10000~12000 km 가량을 주행할 경우 교환해주어야 하는 한계점이 있다. 또한 최근 장착되고 있는 냄새를 제거하는 카본 필터(carbon filter)의 경우 냄새를 제거하는 기능보다는 단순히 냄새를 희석시키는 기능만을 가지고 있을 뿐 근본적인 냄새 제거는 하지 못하고 있는 실정이다. 또한 그림 5에서와 같이 1  $\mu\text{m}$  이하 서브마이크론(Submicron) 입자의 캐빈 필터에서 포집율은 40%로 매우 낮은 실정이다. 본 절에서는 이러한 서브마이크론 입자, 즉 미세 입자를 제어하기 위한 방법들을 제시

한다. 그러나 이 방법들은 아직 실험실에서의 연구단계이며 실용화되지는 않았다.

#### 3. 1 전기집진기 + 캐빈 에어 필터

전기집진기는 상압 코로나 방전을 이용하여 입자를 포집하는 장치이며, 이는 일종의 저온 플라즈마 또는 비열플라즈마(non-thermal plasma) 기술이다. 코로나 방전 원리를 설명하기 위해 그림 6과 같은 wire-plate 형상의 반응기를 살펴보자. 만약 plate를 접지시킨 상태에서 wire에 음전압을 가하고 점차 그 세기를 증가시키면 wire 근방에서 중성의 공기가 양전하와 음전하(주로 전자)로 분리된다(electrical breakdown). 분리 후에 전기장의 영향으로 양전하는 wire로 이동하며, 음전하는 plate로 이동하면서 전기적으로 중성인 공기와 충돌하여

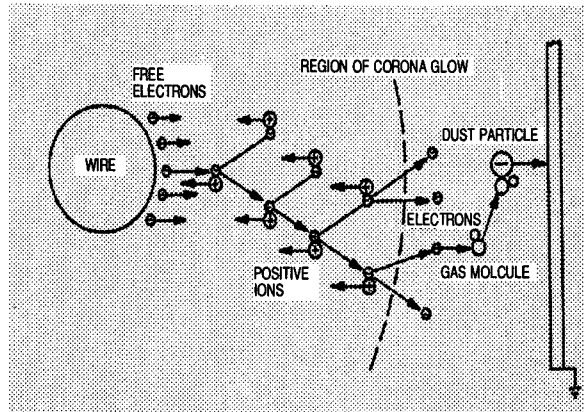


그림 6 코로나방전 개략도

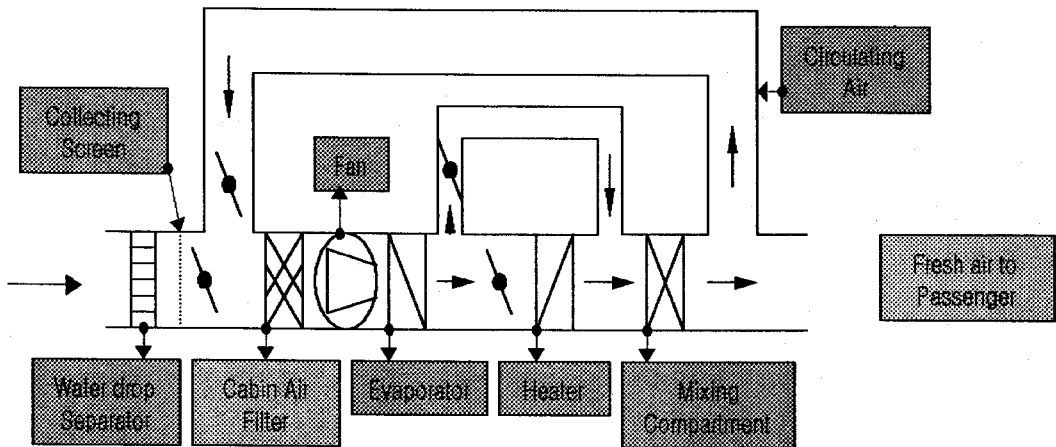


그림 7 승용차의 공기 순환 시스템 구성

또 다른 양전하와 전자를 발생시킨다. 이렇게 해서 순간적으로 많은 전자들이 연쇄반응으로 생성되어(electrical avalanche) plate를 향해 움직인다. 그러나 일단 wire 근방의 작은 영역(코로나 영역)을 벗어나면 전자들의 활성도는 줄어들게 되어 공기분자에 안착하게 된다. 따라서 공기분자는 음이온화되며 이 음이온은 양극 즉 plate를 따라 움직인다. 이 음이온이 입

자와 만나면 입자에 부착되어 입자를 (-)로 대전시킨다. (-)로 대전된 입자는 궁극적으로 plate로 집진된다. 지금까지 방전극 형상이 wire인 경우를 예로 들었지만 끝이 날카로운 pin 형상의 경우 방전이 더 잘되는 것으로 알려져 있다.

캐빈 필터는 그림 7과 같이 외기가 자동차의 냉/난방 장치로 향하는 덕트 내에 설치되는데

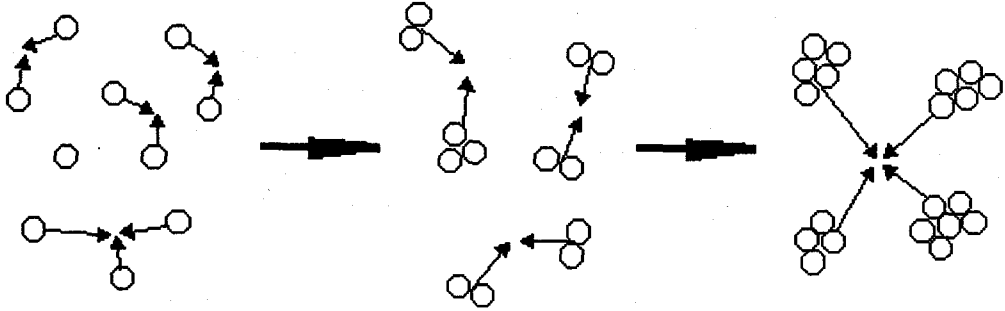


그림 8 Coagulation의 정의

방전극을 덕트 중심축을 따라 설치하고 캐빈 필터 근처에 접지극을 설치한다면 기존의 필터 포집 외에 추가적인 전기적 효과를 얻을 수 있을 것이다.<sup>(3)</sup> 전기방전은 고전압/저전류이므로 실제 소모되는 전력은 생각보다 적다고 알려져 있고 따라서 기존의 배터리 이용이 가능하다.

### 3. 2 전기응집기 + 캐빈 에어 필터

전기응집기는 위에서 설명한 전기집진기에 추가적으로 교류전기장을 인가하는 장치가 부착된다. 입자들이 충돌(collision)하여 부착(adhesion)되는 현상을 응집이라고 하며, 이는 그림 8에 나와 있는 바와 같이 전체 질량은 보존되면서 입자 크기가 커지며 숫자는 줄어드는 현상이다. 응집은 크게 입자들의 브라운 운동에 의한 충돌로 인해 일어나는 브라운 응집과 외부에서 가해진 힘에 의해 일어나는 운동(kinematic) 응집의 두 가지로 나눌 수 있다. 운동 응집에는 난류 응집, 음향 응집, 전기 응

집, 중력 응집 등을 그 예로 들 수 있다.

이 중 전기 응집의 원리는 코로나 방전으로 대전되어 같은 극성(unipolar)을 띤 대기중의 미세 입자가 교류 전기장내로 들어가게 되면 입자는 진동하게 되어 입자 상호간에 부딪힐 확률이 증가되고 부딪힌 입자는 서로 부착되어 응집이 일어나게 된다는 것이다. 코로나 방전을 이용하는 목적은 앞서서도 설명한 바와 같이 교류 전기장으로 입자가 유입되었을 때 교류 전기장 내에서 입자의 운동을 활발하게 만들기 위해서 입자에 극성을 띄워 주기 위함이다. 입자가 대전되는 원리는 이온들의 열적 확산의 원리(브라운 운동)에 의해 대전되는 확산 하전과 외부에서 가해진 전기장에 의해 이온이 전기력선을 따라 이동하다가 입자에 부착되어 대전되는 전기장 하전이 있는데 주로 전기장 하전에 의해 입자가 대전되는 작용이 유리하므로 외부에서 전기장을 가해주게 된다. 이러한 대전 현상이 발생되기 위해서는 고농도의 단극

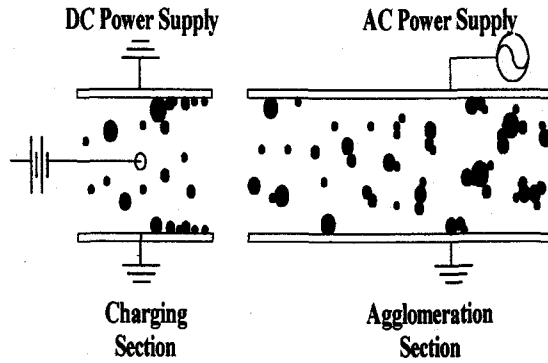


그림 9 전기응집기 개략도

이온이 필요하다. 그러나, 이러한 종류의 이온은 상호 반발작용이 있고, 또 전기이동도가 크기 때문에 그 수명은 짧다. 따라서 이들의 하전 원리를 응용하기 위해서는 이온을 계속적으로 생성시켜 주어야 한다. 이온은 공기 중에서 방사선이나 자외선, 연소, 코로나 방전등에 의해 생성된다. 이 중 코로나 방전만이 에어로졸을 하전하는 데에 충분한 농도의 단극 이온을 생성할 수 있다. 코로나 방전을 통과한 입자는 교류 전기장내로 유입되면 입자가 띄고 있는 극성과 교류 전기장의 극성에 의해 입자는 진동하게 된다. 상대적으로 많은 양의 전하를 갖고 있는 큰 입자는 적은 입자보다 진동되는 속도가 크고 결과적으로 진동되는 변위도 크다고 알려져 있다. 이처럼 큰 입자가 큰 변위를 가지고 진동됨에 따라 작은 입자와 충돌되는 횟수가 많아지게 되고 결국 큰 입자와 적은 입자가 서로 응집하게 된다. 교류 전기장을 통과한 큰 입자는 수밀도가 증가하게 되지만 큰 입자

에 달라붙게 된 작은 입자는 수밀도가 감소하게 된다. 결국 기존의 입자 포집기에서 포집되지 않은 작은 입자는 큰 입자로 성장하게 되어 캐빈 필터와 같은 기존의 포집 장치로 포집할 수 있다.

그림 9는 응집기 시스템의 개요이다. 하전부와 응집부로 구성된 응집기를 통과하는 입자는 다음과 같은 응집 과정은 겪는다. 하전부에서 코로나 방전을 통해 포화 하전된 입자는 AC 전기장으로 유입된 후, 교류 주파수와 입자 하전량에 따라 유동 방향에 수직으로 진동하며 전장을 빠져나간다. 포화하전량은 입자의 표면적에 비례하므로 하전량이 많은 큰 입자는 유동 진행 방향에 수직으로 빠르게 먼 거리를 왕복하고, 작은 입자는 상대적으로 느리게 짧은 거리를 움직인다. 이 과정에서 입자들 간에 상대적인 속도 차이가 발생하고 충돌과 응집이 일어난다. 결국 입자 크기분포는 큰 입자들의 비율이 증가하는 방향으로 이동하게 되고 반대



로 미세 입자의 수농도는 감소한다. 하전부에서 고전압을 인가하는 방법에 따라 응집부 유입하는 입자가 모두 같은 극성을 띄는 단극성이거나 다른 극성인 양극성일 수 있다. 입자의 극성을 결정하는 하전부의 특성은 입자간의 상대 운동뿐 아니라 쿨롱힘이 응집에 영향을 미치게 한다.

전기장 응집을 이용해 입자 크기를 조절하는 연구는 AC와 DC 전기장을 이용하는 여러 방식으로 진행되고 있는데, 아직까지는 실험실에서 수행하는 수준에 머물러 있다. 많은 연구자들은 응집부에 AC 전기장을 적용했다. Kobashi<sup>(4)</sup>는 비산재 입자를 양극성으로 하전시켜 평행 평판형 응집기를 통과시켰는데, 1.7  $\mu\text{m}$  이하의 입자들의 무게 농도가 대략 20% 감소한 결과를 얻었다. Mitchner와 Self<sup>(5)</sup>는 0.3~10  $\mu\text{m}$  입경 범위의 8  $\text{g}/\text{m}^3$ 의 비산재를 발생시켜 실험을 수행했는데, 평행 평판 응집기내의 체류 시간을 1초로 설정한 경우 0.3~2  $\mu\text{m}$  범위 입자의 무게 농도가 30% 감소한 결과를 얻었다. Hautanen 등<sup>(6)</sup>은 단극성 하전 오일 입자를 대상으로 응집기를 평판과 4개의 전극봉 형상의 두 가지에 대해 실험했는데, 1  $\mu\text{m}$  이하의 입자 감소는 4~8%였다. Kildeso 등<sup>(7)</sup>은 질량 농도가 4.2  $\text{g}/\text{m}^3$ 이고 질량 중앙입경이 약 2  $\mu\text{m}$ 인 석회분말을 양극성으로 대전했는데, 체류시간이 2.1초인 경우 1 m 이하의 입자 감소율 50%를 얻었고, 평행 평판형 응집기에 5.2  $\text{kV}/\text{cm}$ 의 전기장을 인가한 후, 50Hz와 200Hz의 주파수에 대해 실험한 결과 차이가 없다고 보고했다. Laitinen 등<sup>(8)</sup>은 입자 수농도가  $5 \times 10^6 \text{ cm}^3$ 이고 질량평균경이 0.5  $\mu\text{m}$ 인 액체인 오일 입

자를 대상으로 평행 평판형 응집기를 대상으로 실험했는데, 0.1~1.0  $\mu\text{m}$  입자의 수농도가 17~19% 감소했다. Lehtinen 등<sup>(9)</sup>은 AC 전기장 내에서 작은 입자와 큰 액적 입자가 다른 극성으로 하전된 경우의 입자 크기 분포 변화를 이론적으로 예측했다. DC 전기장을 이용한 연구로 와이어-와이어 형상의 하전부와 AC 전기장을 인가하는 응집부를 통합한 구조에 NaCl 입자를 대상으로 실험한 Gutsch 등<sup>(10)</sup>과 4개의 전극봉을 가진 응집기를 이용해 응집 실험을 수행한 Watanabe 등<sup>(11)</sup>이 있다. 국내에서는 박종인 등<sup>(12)</sup>이 화염에서 생성된 매연에 AC 전기장을 적용한 실험과 김연승 등<sup>(13)</sup>이 상온에서 NaCl을 대상으로 수행한 실험이 있지만, 아직은 정성적인 결과를 제시하는데 그치고 있다. 최근에는 지준호 등<sup>(14)</sup>이 전기응집을 실험적으로 연구하였다.

#### 4. 맺음말

대부분의 자동차는 운전시 도로로부터 각종 유해한 악성 미립자상 물질과 유해기체가 그대로 차량내부로 유입되고, 또한 히터나 에어컨의 가동시 발생하는 악취와 세균성 미세 먼지가 차량 내부로 유입되어 운전자는 항상 이러한 분위기에 노출되어 운전하고 있는 실정이다. 봄에는 꽃가루로 인한 알레르기, 여름철에는 자동차 매연과 배기가스로 인한 호흡곤란과 인간의 폐 깊숙이 침투하여 침착하는 미세 먼지인 타이어먼지, 디젤 검댕(soot) 등과 건강에 치명적인 브레이크 라이닝 먼지 등의 악성 미립상 물질들이 그대로 차량 내부로 유입되어 운전자의 건강과 안전운행을 위협하고 있는 게

현실이다. 외국의 경우 1989년 이래로 캐빈 에어 필터를 개발하여 승용차에 설치했고, 국내에서는 1995년부터 각 자동차회사들이 앞 다투어 필터를 수입 장착하고 있다.

국내에서 생산되고 있는 차량에 부착되고 있는 에어 필터는 단순히 입자상의 물질만을 제거하는 먼지 필터만을 장착하고 있는 실정이다. 그러나 자동차 업계에서는 경쟁적으로 공기 조화 분야에 신경을 쓰고 있는 실정이다. 가령 최근 현대 자동차에서 발표한 EF 소나타에 냄새 제거 필터를 유일하게 장착하고 있는 것을 보면 업계에서 가지고 있는 관심을 느낄 수 있다. 그러나 아직까지는 국내의 경우 소형 차량에는 부착되고 있지 않은 실정이며 장착되고 있는 필터는 독일에서 전량 수입하여 국내에서는 조립만 하는 수준에 있다. 특히 외국의 경우에도 유럽지역에서는 독일의 모 회사에서 80%의 시장을 독점하고 있고, 미국의 경우에도 한 회사에서 거의 독점하고 있는 실정으로 기술력이 축적되지 않은 실정이다. 그러므로 외국 자동차 시장에서 가격 경쟁력을 가지기 위해서는 필터 국산화가 시급한 상황이다.

그러나 외국에서 생산되는 필터의 경우에도 미세 입자에 대한 포집효율은 상당히 저조한 실정이다. 위에서 언급한 바와 같이 1 $\mu$ m 이하의 입자에 관해서는 포집 효율이 무게를 기준으로 했을 경우 40%를 밑돌 정도로 저조한 상황이다. 미세 입자에 대한 포집효율이 적다는 것은 개수측면에서 상당히 많은 양이 유입되는 것을 의미한다.

또한 가까운 미래에 지능형 교통시스템(ITS : Intelligent Transport System)의 도입과

결부되어 자동차 실내는 첨단 컴퓨터화 될 날이 얼마 남지 않았다. 섬세한 부분까지 감지하는 센서를 활용하므로 차량과 인체에 유해한 미세 입자는 이러한 센서에 충분히 피해를 입힐 수 있고, 지능형 차량이라는 이름에 걸맞지 않게 내부오염을 발생시킬 수가 있는 것이다.

그러므로 환경 분야에 전 세계적으로 관심을 갖고 있는 현 시점에서 미세 입자 포집을 위하여 국산 기술을 적용한 차세대 필터의 개발(더 많은 실험, 제조 공정 분석, 원가 절감 방안, 국내외 시장점유 고려)과 공기 조화 분야의 정부차원에서 기준을 설정하면 자동차의 쾌적한 실내공기를 유지함은 물론 국가 이미지 부각에도 기여될 것으로 시사된다.

#### - 참고 문헌 -

1. Coshin, A., 1992, "Cleaner Automotive Passenger Air through Cabin Filters," Proceeding of TANDEC Conference, pp. 13-15.
2. 한국에너지기술연구소, 1998, 자동차내 유입공기 정화용 한국형 고효율 Cabin Air Filter 개발, 산업자원부 보고서
3. Kim, S., Sioutas, C. and Chang, M., 2000, "Electrostatic Enhancement of the Collection Efficiency of Stainless Steel Fiber Filters," Aerosol Science and Technology, Vol. 32, pp. 197~213.
4. Kobashi, M., 1978, Particle Agglomeration Induced by Alternating Electric Fields, Ph. D. Thesis, Stanford University.
5. Mitchner, M. and Self, S., 1983, Basic

- Studies to Reduce Electrostatic Precipitator Size and Cost, EPRI Report CS-3226.
6. Hautanen, J., Kilpelainen, M., Kauppinen, E. I., Jokiniemi, J. and Lehtinen, K., 1995, "Electrical Agglomeration of Aerosol Particles in an Alternating Electric Field," *Aerosol. Sci. Technol.*, Vol. 22, pp 181~189.
  7. Kildeso, J., Bhatia, V. K., Lind, L., Johnson, E. and Johansen, A., 1995, "An Experimental Investigation for Agglomeration of Aerosols in Alternating Electric Fields," *Aerosol Sci. Technol.*, Vol. 2, pp. 422~430.
  8. Laitinen, A., Hautanen, J., Keskinen, J., Kauppinen, E., Jokiniemi, J. and Lehtinen, K., 1996, "Bipolar Charged Aerosol Agglomeration with Alternating Electric Field in Laminar Gas Flow," *J. Electrostatics*, Vol. 38, pp. 303~315.
  9. Lehtinen, K., Jokiniemi, J., Kauppinen, E. I. and Hautanen, J., 1995, "Kinematic Coagulation of Charged Droplets in an Alternating Electric Field," *Aerosol. Sci. Technol.*, Vol 23, pp 422~430.
  10. Gutsch, A. and Loffler, F., 1994, "Electrically Enhanced Agglomeration of Nanosized Aerosols," *J. Electrostatics*, Vol. 25, pp. 307~308.
  11. Watanabe, T., Tochikubo, F., Koizumi, Y., Tsuchida, T., Hautanen, J. and Kauppinen, E., 1995, "Submicron Particle Agglomeration by an Electrostatic Agglomerator," *J. Aerosol Sci.*, Vol. 25, pp. s367~383.
  12. 박종인, 지준호, 황정호, 1997, "LPG 확산 화염내 매연입자의 전기적 특성 및 전기장에 의한 입자 크기 변화," *대한기계학회 논문집 B권*, 제21권, 제10호, pp. 1326~1338.
  13. 김연승, 황정호, 1999, "AC 주파수의 변화가 입자의 전기 응집에 미치는 연구," *대한기계학회 논문집 B권*, 제23권, 제12호, pp. 1527~1534.
  14. 지준호, 황정호, 배귀남, 김용진, 2000, "AC 전기장 내 하전 액체 입자의 응집에 관한 실험적 연구," *대한기계학회논문집 (B) 심사증*.