

공기부유입자의 기초이론

V. 열 및 복사력에 의한 입자의 운동

복사력(Radiometric forces)이란 입자의 온도 및 농도 구배에서, 입자와 주위 기체 분자와의 불균형적인 상호작용에서 기인되는 힘을 일컫는다. 입자의 운동은 구배의 종류에 따라 thermophoresis, photophoresis, 혹은 diffusiophoresis등으로 불리워진다. 이러한 힘들에 밀접한 관계를 갖는 것들은 복사압과 Stefan flow로 부터 발생한 힘이다. 이러한 모든 힘들은 매우 약하며 aerosol입자의 매우 높은 mobility때문에 상당한 aerosol운동을 야기 시킨다. 이러한 힘들은 거시적인 물체에 대해서는 중요성이 없으며 일상 생활의 경험을 통하여 생각해 볼 때, 그들에 대한 직관적인 이해는 불필요하다. 지난 수세기 동안 이러한 새로운 힘에 대하여 많은 과학적 관심이 집중되어 왔지만, 이들에 대한 실제적인 중요성이나 응용은 미비한 실정이다. Thermophoresis는 aerosol의 표본검출에 사용되는 열적 침전기의 기초가 된다.

1. Thermophoresis

기체내에 온도구배가 형성되어 있을 때, 그 기체내의 aerosol 입자는 온도가 감소하는 방향으로 힘을 받는다. 이러한 힘에 의해 발생된 aerosol입자의 운동을 thermophoresis라고 한다. 열적 힘(thermal forces)의 크기는 기체와 입자의 성질 및

생산기술연구원
(연구개발본부)
조교수 오 명 도

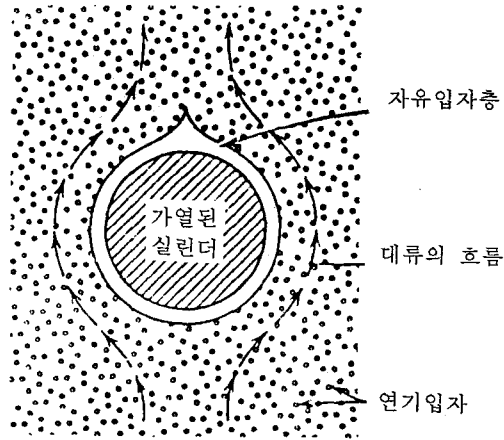


그림 1. 가열된 실린더 주위의 자유입자 층

온도구배에 의존한다. Thermophoresis에 대한 초기의 연구는, 연기 속에 놓여진 금속 봉과 같이 가열된 물체 주위에서 관찰된 자유분진층(Dust-free layer)에 대한 경험적인 연구이었다. 연기 입자는 가열된 물체에 의해 반발되어지는 듯 하며, 그림 1에서 나타내는 바와 같이 두께 1mm이내의 자유입자층(Particle-free layer)을 형성한다. 이러한 층의 두께는 연기의 성분과는 무관하며 물체와 기체 사이의 온도구배의 제곱근에 비례한다. 그 후 수행된 자유입자층에 관한 연구는 물체 표면 근방의 온도구배에서의 열적 힘을 밝히는 일이었다.

열적 힘과 aerosol입자의 운동은 항상 온도가 감소하는 방향으로 일어난다. 차가운 표면이 더운 기체에 근접해 있을 때에는, thermophoresis는 기체내의 입자들을 차가운 표면에 부착시킨다. 이것은 바로, 겨울에

담배연기가 창문의 안쪽 면에 부착되는 메카니즘과 같다. 이러한 현상은 또한, 추운 기후에 노출되어 있는 오래된 석고벽을 얼룩지게 만드는 주된 원인이라고도 생각되어진다. 이러한 형식은 표면의 온도분포와 열적 부착률을 지배하는 벽이면의 구조에 약 영향을 미친다. Thermophoresis는 연소중에 연기의 형성을 일으킨다. 이러한 것은 산업용 열교환기에서 관이 뜨거운 기체의 흐름으로부터 열적으로 부착된 미세한 입자들로 쌓여질 때 그 효율을 저하시킨다.

작은 입자들($d < \lambda$)의 경우, 열적 힘은 차가운 쪽에 비하여 더운 쪽에 있는 기체분자들의 더 큰 운동량 전달에 의해서 발생한다. 그림 2에서 보는 바와 같이, 온도구배 때문에 왼쪽으로부터 다가오는 기체분자가 오른쪽에서 다가오는 것보다 더 큰 속도를 갖는다. 왼쪽으로부터 받은 더 큰 운동량은

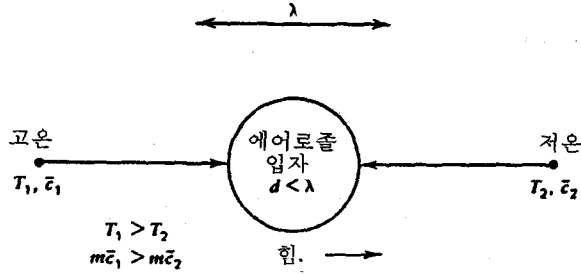


그림 2. 온도구배가 존재하는 곳에서 입자 ($d < \lambda$)에 가해지는 분자충돌

낮은 온도 방향인 오른쪽으로 정미힘 즉, 열적 힘을 발생시킨다.

이러한 힘은 입자표면에서의 분자의 반발 속성에 의존하므로 이 힘에 대한 정확한 표현은 여기에 보여진 것 보다는 훨씬 복잡하다(Waldmann and Schmitt, 1966). 직경이 d 인 입자에 작용하는 이론적인 열적 힘은 다음과 같이 표현된다.

$$F_{th} = \frac{-p\lambda d^2 \nabla T}{T} \quad \text{for } d < \lambda \quad (1)$$

여기서 p 는 기체압력, λ 는 기체의 평균자유행로, ∇T 는 온도구배이며 T 는 입자의 절대온도이다. 힘이 온도가 감소하는 방향으로 작용하므로 음의 부호가 필요하다. Thermophoresis의 속도는 Waldmann과 Schmitt(1966)에 의하여 다음과 같이 주어진다.

$$V_{th} = \frac{-0.55 \eta \nabla T}{\rho_g T} \quad \text{for } d > \lambda \quad (2)$$

이것은 입자의 크기와는 무관하며 온도구배에 정비례한다. 표준상태의 공기 (20°C , 1atm)인 경우, 단위온도구배(1K/cm)에서의 thermophoresis의 속도는

$$\frac{V_{th}}{\nabla T} \approx -2.8 \times 10^{-4} \frac{\text{cm/s}}{\text{K/cm}} \quad \text{for } d < 0.1 \mu\text{m} \quad (3)$$

이다.

큰 입자($d > \lambda$)의 경우, 이 메카니즘은 온도구배가 입자의 내부에 존재하기 때문에 더욱 복잡하다. 이 구배는 기체의 온도구배가 바로 입자의 주의를 둘러 쌓도록 영향을 준다. 이에 따른 결과는 차가운 쪽 보다는 더운 쪽의 입자가 기체분자로 부터의 운동량을 더 많이 받는다는 것이며, 정미힘은 작은 입자의 경우와 같은 방향인 차가운 영역쪽으로 힘이 작용한다. 이 경우, 열적 힘은 공기의 열전도도 k_a 에 관계하는 입자의 열전도도 k_p 의 영향을 받는다. $d > \lambda$ 인 경우의 열적 힘은 다음과 같이 주어진다.

$$F_{th} = \frac{-9\pi\eta^2dH\nabla T}{2\rho_g T} \text{ for } d > \lambda \quad (4)$$

여기서 계수 H는 입자 내부의 온도구배의 영향을 포함하고 있다. Brock(1962)에 의해 제시된 분자수용계수(molecular accommodation coefficients)를 사용하면 H에 관한 식은

$$H \approx \left(\frac{1}{1+6\lambda/d} \right) \left(\frac{k_a/k_p+4.4\lambda/d}{1+2k_a/k_p+8.8\lambda/d} \right) \quad (5)$$

가 된다.

공기와 그의 여러 aerosol물질들의 열전도도가 표 1에 나타나 있다. $d > \lambda$ 인 경우의 thermophoresis의 속도는 식 4와 Stokes의 항력과 같다고 하여 구하면

$$V_{th} = \frac{-3\eta C_c H \nabla T}{2\rho_g T} \text{ for } d > \lambda \quad (6)$$

이다.

그림 3에 보이는 바와 같이, 큰 입자(d/λ)의 thermophoresis 속도는 입자의 크기에 큰 영향을 받지 않는다. 회전에는 필요한 시간이 온도 조절 시간보다 크기 때문에 입자의 브라운 회전 운동은 입자 내부의 온도구배 형성을 방해하지 않는다(Fuchs, 1964).

표 2는 단위 온도구배에서의 terminal

표 1. 물질의 열전도도

| Material | Thermal Conductivity (cal/cm s K) |
|--------------------------|--------------------------------------|
| Steric acid | 0.0003 |
| Sodium chloride | 0.016 |
| Iron | 0.16 |
| Mercury | 0.02 |
| Asbestos | 0.00019 |
| Carbon | 0.01 |
| Granite | 0.005 |
| Glass | 0.002 |
| Magnesium oxide | 0.0003 |
| Quartz | 0.023 |
| Fused silica | 0.0024 |
| Glyccrol | 0.00064 |
| Castor oil | 0.00043 |
| Paraffin oil | 0.00030 |
| Clay | 0.0017 |
| Air at 20°C ^b | 0.000056 |

^aAfter Mercer(1973).

^b $K_a = (4.67 \times 10^{-6} [T^{3/2}/(T+125)])$

표 2. 20°C에서 단위온도구배에 따른 Terminal Settling과 Thermophoretic Velocity

| Particle Diameter (μm) | Terminal Settling Velocity (cm/s) | Thermophoretic Velocity ^a (cm/s) |
|--|--------------------------------------|--|
| 0.01 | 6.7×10^{-6} | 2.8×10^{-4} |
| 0.1 | 8.6×10^{-5} | 2.0×10^{-4} |
| 1.0 | 3.5×10^{-3} | 1.3×10^{-4} |
| 10.0 | 3.1×10^{-1} | 7.8×10^{-5} |

^a $K_p = 10K_a$

settling과 thermophoresis 속도의 비교를 나타낸다. 입자의 크기가 $0.1\mu\text{m}$ 보다 작은 경우에는 적은 온도구배(1K/cm)에서도 V_{th} 는 V_{TS} 를 초과한다. 표 3은 단위 온도구배하에

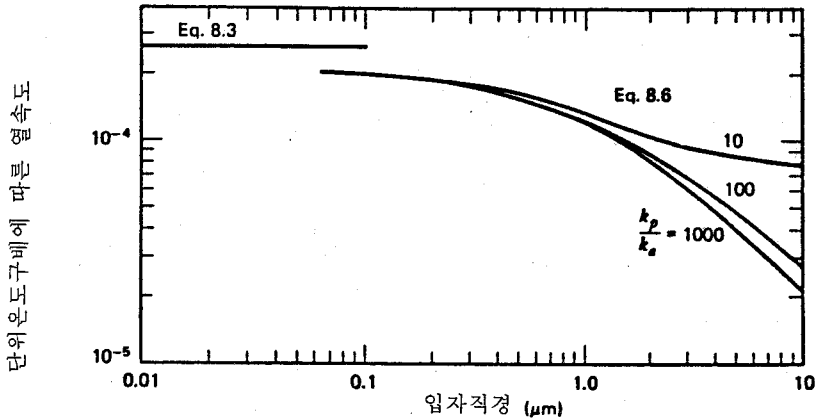


그림 3. 표준상태의 입자크기 대 단위온도 구배에 따른 열속도

서 100초 동안에 thermophoresis에 의한 표면 부착이 0.2 μ m보다 큰 입자의 확산에 의한 부착 보다 크음을 나타내고 있다.

표 3. 20 $^{\circ}$ C에서의 단위온도구배에 따른 100 초 동안의 확산과 Thermophoresis에 의한 침착

| Particle Diameter (μ m) | Cumulative Deposition | |
|------------------------------|-----------------------------|---|
| | Diffusion (number/cm 2) | Thermophoresis ^a (number/cm 2) |
| 0.01 | 0.26 | 0.028 |
| 0.1 | 0.029 | 0.020 |
| 1.0 | 0.0059 | 0.013 |
| 10.0 | 0.0017 | 0.0078 |

^a $K_p = 10K_a$

2. 열적 침전기(Thermal Precipitators)

입자를 표면에 부착시키는 열적 침전기를

이용하여 aerosol입자를 포집하는 장치를 열적 침전기라고 한다. 이러한 장치들은 선, 리본, 혹은 판과 같은 가열부를 포함하고 있으며, aerosol을 가열부와 입자들이 부착되는 온도가 다른 두개의 판 사이를 통과시킨다. Thermophoresis의 속도가 입자의 크기에 따라 감소하지 않으므로 이 장치는 작은 입자의 포집에 사용할 수 있는 매우 효과적인 포집기이다. 적절히 설계된 침전기의 경우에는 입자의 크기가 0.001-5 μ m 혹은 10 μ m인 경우, 포집효율이 실제로 100%까지 된다. 열적 침전기는 분당 수 입방 센티미터의 등급을 갖는 매우 낮은 체적 유속으로 특징지어진다. 이러한 특성은 열적 침전기가 광학 혹은 전자 현미경으로 관찰이 가능한 입자들의 적은 양을 포집하는데 적합하게 하여준다.

열적 침전기는 가열부와 포집면 간에 50

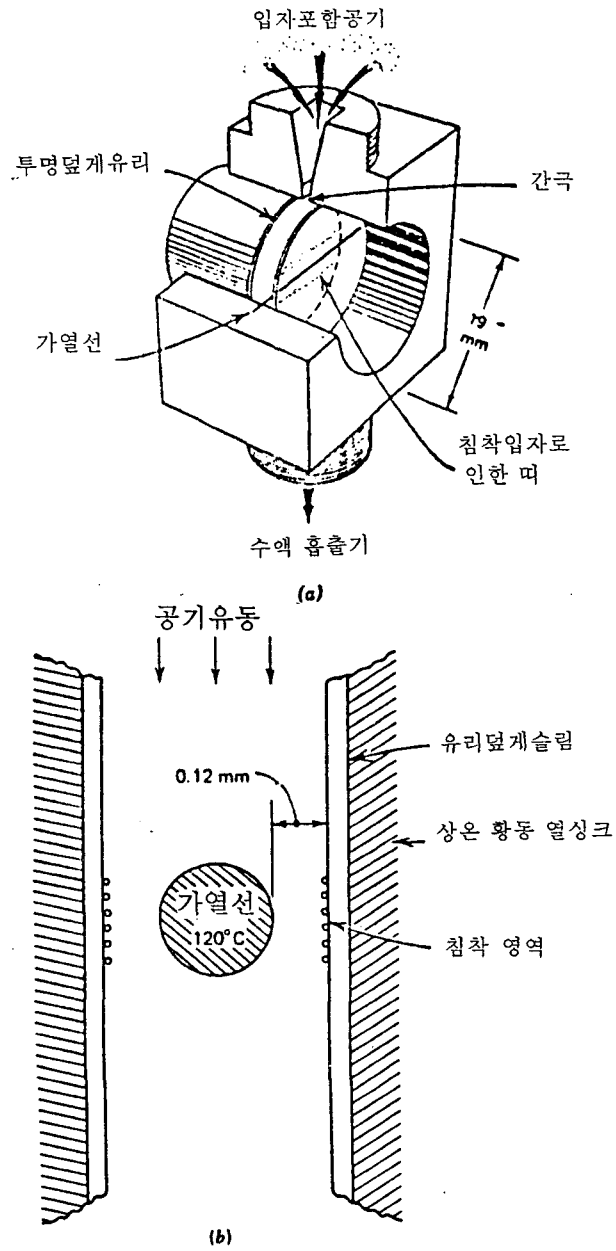


그림 4. 가열선과 평판 열적 침전기
 (a) 내부절단 도면 (b) 수평절단 도면

-200K 정도의 온도 차이를 갖는다. 이러한 온도 차이는 1000-10,000K/cm 정도의 큰 온도구배를 나타낸다. 가장 많이 알려진 열적 침전기는 그림 4에 나타낸 바와 같이 Green과 Watson(1035)의 선과 판형 설계이다. 이것은 수 년간 영국의 광산에서 먼지의 농도를 측정하는데 사용되었다. 이것은 직경이 0.25mm인 가열된 니크롬선이 120°C를 유지하며 0.5mm 떨어진 2개의 glass microscope cover slips사이의 중간에 위치한다. 이 cover slip은 heat sink의 역할을 하는 황동 실린더에 고정되어 있으며 포집면의 온도를 유지하여 최대온도구배가 8000K/cm가 되도록 하여준다. 표본검출 유속은 7cm³/min이다.

열적 침전기 조작시, 작은 입자들이 먼저 부착되고 큰 입자는 나중에 부착되는 식으로 유동방향에 따라 부착되는 입자크기의 차이가 생긴다. 현미경을 통하여 정확한 크기 분포를 얻기 위하여는 기체의 유동방향으로, 부착되는 떠부분을 가로질러 관찰하는 것이 필요하다. 이러한 문제는 가열된 선 대신에 가열된 판을 사용함으로써 최소화할 수 있다. 이러한 상황에서는, 입자가 더 오랜 시간 동안 열적 힘에 노출되어있기 때문에 온도구배가 클 필요는 없다. 어떤 경우에는 유속이 1L/min 까지 이르는 것도 사용될 수 있다. 부착 형태에 있어서 입자 크기의 불균일을 해결하기 위한 또 다른 방

법은 부착면 혹은 가열된 부분을 앞뒤로 흔드는 것이다. 어떤 설계방법은 aerosol의 농도를 시간의 함수로 측정하기 위하여 부착면을 연속적으로 회전시키도록 되어있다. 진동형이나 회전형 침전기는 정지형보다 누설이 더 많이 되는 문제점을 가지고 있다.

또한 100% 효율의 submicrometer particles을 포집하는데 있어서, 열적 침전기는 미시적인 연구에 있어서 두가지의 다른 잇점을 갖고 있다. 관성적인 부착은 어느 정도 정돈되어 있는 반면, 포집된 입자들은 부착면에 불균일하게 놓여진다. 더우기, 열적 부착은 긴 덩어리들이 파괴되지 않고 일어나는 점차적인 과정이다.

공기 정화장치로서의 열적 침전기의 응용이 Gieseke(1972)에 의해 검토되어 왔다. 포집의 주 메카니즘으로서 열적 침전을 사용하는 대형 스케일의 공기 정화기는 없다. 이것은 thermophoresis는 더운 기체가 냉각될 때 공기정화기에서 미세한 입자들의 포집에 기여하기 때문인 것 같다. Gieseke (1972)는 열적 침전기로 0.47m³/sec(1000ft³/min)의 더러운 기체를 정화하기 위해서 82kW(110hp)의 동력이 필요할 것이라고 평가했다.

3. 그밖의 복사력(Other Radiometric Forces)

빛에 의하여 photophoresis와 복사압과 같

은 2가지 종류의 aerosol 입자의 운동이 야기될 수 있다. photophoresis는 입자에 가해지는 빛이 입자내에 온도구배를 형성시키는 특수한 경우의 thermophoresis이다. 입자에 밀접한 주변의 기체는 동일한 구배를 가지며 1절에서 설명한 것과 같은 복사력을 형성한다. 이 메카니즘은 thermophoresis의 경우와 동일하지만, 기체내에서의 전체적인 온도구배는 존재하지 않는다. 이러한 상황에서 입자내부의 구배를 정의하기는 thermophoresis의 경우 보다 훨씬 어렵다. Photophoretic force는 빛의 강도와 파장, 입자의 크기, 상, 성분 그리고 기체압력에 의존한다. 또한 $\lambda \approx d$ 인 경우에 최대가 된다. 아래에 설명한 바와 같이, Photophoresis는 복사압력과 달리 입자와 주위 기체와의 상호작용의 결과이며 진공상태에서는 존재하지 않는다.

Photophoresis가 발생하기 위해서는, 입자들이 빛의 일부를 흡수해야만 한다. 만일, 입자들이 빛을 강하게 흡수한다면 광원과 접하고 있는 뜨거운 면과 균형을 유지할 것이며 photophoretic force는 광원으로부터 멀어질 것이다. 빛을 약하게 흡수하는 입자들은 임의의 크기를 요할 것이며, 흡수계수는 광원으로부터 멀리 떨어진 입자의 면이 뜨거워지는 것과 같은 방식으로, 입사하는 빛에 초점을 맞출 것이다. 그리고 그 입자는 광원방향으로의 복사력을 받을 것이다. 이것

을 역 photphoresis라 한다. Photophoresis는 Preining(1966)과 Kerker(1974)에 의하여 연구되어 왔다. Photphoresis는 대기 이상에서의 submicrometric particle의 운동에 있어서 중요한 의미를 갖고 있으나, 실제적인 응용은 없는 실정이다.

복사압 혹은 광압은 빛 자체의 굴절과 흡수에 의한 운동량 전달로 인하여 발생한다. 빛은 그의 운동량이 입자에 의해 굴절(혹은 흡수)됨에 따라 변하여 광원으로부터 멀어지는 힘을 유발하는 광자의 흐름으로 생각되어 진다.

입자에 작용하는 복사압은 다음과 같이 표현된다.

$$F_{rp} = \frac{I_0 d^2 Q_{rp}}{4c} \quad (7)$$

여기서, I 는 빛의 입사강도이고 c 는 광속이다. Q_{rp} 는 입자에 입사되는 빛의 형상을 기하학적으로 정의하는 효율인자(efficiency factor)이며 이것은 광원으로부터 멀어지는 방향에 있는 입자쪽으로 운동량을 전달하는데 효과적이다. Q_{rp} 는 입자크기, 파장, 굴절지수와 흡수계수와 관련된 복잡한 함수이다(kerker, 1969). 가시광선에 기인한 복사압력은 입자의 크기가 $0.3\mu\text{m}$ 이내로 감소함에 따라 급격히 감소한다.

복사압은 전자기복사의 직접적인 영향이

므로 입자가 공기중에 있거나 혹은 진공상태에 있건간에 힘은 동일하다. 이것이 바로 혜성의 꼬리를 태양으로부터 떨어진 방향으로 밀어내는 메카니즘이다. 그들은 혜성에게 떨어져 나간 미시적인 입자들로 구성되어 있으며 수백마일의 길이를 가지고 있을 것이다. 고강도의 레이저 광선은 중력에 대하여 입자들(1-100 μm)을 들어 올리는 데 사용된다(Ashkin, 1980).

기체의 불균일 혼합물내에 부유하고 있는 입자는 기체성분의 농도구배에 기인한 diffusiophoretic force를 받게 될 것이다. 이것은 기체분자로 부터의 불균일한 운동량 전달에서 기인한 입자에 작용하는 복사력이다. 기체나 증기가 공기중에서 확산할 때, 전체 압력을 일정하게 유지하기 위하여 증기는 한쪽으로 공기는 또 다른 한쪽으로 확산하는 부차적인 구배가 형성된다. 만일, 증기의 분자가 공기분자보다 더 무겁다면, 증기의 농도가 더 높은 쪽으로 부터 입자 방향으로 더 큰 운동량을 전달 할 것이다. 이것은 무거운 분자가 확산하는 방향으로 작용하는 입자에 가해진 정미 힘에서 기인한 것이다. 이 힘의 크기는 분자량과 기체의 확산계수는 물론, 농도구배에 의존한다. 또한 이것은 입자의 크기와는 거의 무관하다.

증발 또는 응축중에 있는 액체의 표면 가까이에서는 더욱 복잡한 현상이 존재한다. 두개의 농도구배와 diffusiophoresis 이외에,

Stefan Flow라 불리는 공기의 기체역학적 유동이 존재하는데, 이것은 증발이나 응축하고 있는 표면의 근처에 있는 입자에 Stokes 항력을 가한다. Stefan flow는 증발 표면으로 부터는 멀어지는 방향이며 응축표면으로 향한다. 이것은 단일조건하의 증발 표면 근처에서, thermophoresis의 경우에 관찰된 것과 유사한 얇은 자유분진층을 형성한다. 이것은 약 100여년전에 처음으로 관찰되었다.

증발표면의 근접한 곳에서 전체 압력을 일정하게 유지하기 위해서는, 증기의 농도구배가 동일하지만 농도구배가 반대인 공기의 농도구배와 평형을 유지해야만 한다. 후자는 작은 방울의 표면을 향한 공기분자의 연속적인 확산을 유발하지만, 공기가 표면에 축적될 수 없으므로 증발표면으로의 공기의 확산을 보충하기위하여 증발표면으로 부터 멀어지는 공기의 기체역학적 유동이 존재할 것이다. 표면으로부터 멀어지려는 공기의 전달은 확산에 의한 것이 아닐 것이다. 왜냐하면 이것은 표면을 향한 공기의 농도구배와는 반대가 될것이기 때문이다. 만일, 공기가 증발표면에 도달했을 때 불가사의하게 공기가 응축되었다면 Stefan flow는 존재하지 않을 것이다. 그러나 정상적인 온도에서는 그와 같은 현상은 일어나지 않으므로 이 공기는 기체역학적으로 유동하여 표면으로부터 멀어질 것이다. 표면에서 응

축이 일어날 때에는 이 상황은 뒤바뀌며 Stefan flow는 표면으로 향할 것이다.

대부분의 상황에서 diffusiophoresis와 Stefan flow는 모두 증발 혹은 응축표면 근처의 입자에 작용할 것이다. 이러한 힘은 같은 방향이거나 서로 반대 방향일 것이다. 만일 기체와 증기의 분자량이 동일하다면, diffusiophoresis는 존재하지 않고 다만 Stefan flow만이 존재할 것이다. 표준상태에서 공기중에 있는 수증기의 경우에 있어서, Goldsmith(1966)는 diffusiophoresis와 Stefan flow의 조합으로 부터 구한 속도에 대한 경험적인 표현을 제시하였다.

$$V_{daf} = -1.9 \times 10^{-3} \frac{dp}{dx} \quad (8)$$

여기서 V_{daf} 는 cm/s의 단위를 가지며 dp/dx 는 증기의 분압구배로서 kPa/cm의 단위를 갖는다. 식 8로부터 계산된 속도는 증발하는 작은 방울로부터 멀어지며 응축하는 방울로 향한다. 후자의 상황은 응축을 일으키기 위한 과포화 상태를 형성하고 Stefan flow가 미세한 입자들을 응축방울과 표면으로 운반하는 venturi scrubber와 같은 공기정화장치에서 사용된다.

— 참고 문헌 —

1. Ashkin, A., "Applications of Laser Radiation Pressure." *Science*, 210. 1081-1088(1980).
- Brock.J.R. "On the Theory of Thermal Forces Acting on Aerosol Particles." *J. Colloid Sci.* 17. 768-780(1962).
2. Fuchs, N.A., *The Mechanics of Aerosols*, Pergamon, Oxford, 1964.
3. Gieseke, J.A., in *Air Pollution Control*. W. Strauss(Ed.), Wiley-Interscience, New York. 1972.
4. Goldsmith, P., and May, F. G., in *Aerosol Science*. C.N.Davies(Ed), Academic Press. London. 1966.
5. Green, H. L., and Watson, H. H., *Med. Res. Council, Spec. Rept.* No. 199, His Majesty's Stationery Office, London, 1935.
7. Kerker, M., *The Scattering of Light*, Academic Press, New Yourk, 1969.
8. Kerker, M., "Movement of Small Particles by Light." *Am. Sci.*, 62, 92-98 (1974).
9. Mercer, T.T., *Aerosol Technology in Hazard Eoaluation*, Academic Press, New York, 1973.
10. Preining, O., in *Aerosol Science*, C.N. Davies(Ed), Academic Press, London, 1966.
11. Waldmann, L., and Schmitt, K. H. In *Aerosol Science*, C. N. Davies(Ed.), Academic Press, London, 1966.