

30nm~3000nm 광범위 직경 입자의 공기역학적 집속에 대한 수치해석

이 광 승 · 이 동 근*
부산대학교 기계공학부

(2011년 10월 4일 투고, 2011년 11월 19일 수정, 2011년 11월 29일 게재확정)

A Numerical Simulation of Aerodynamic Focusing of Nanoparticles in a Wide Range of 30nm~3000nm

Kwang-Sung Lee · Donggeun Lee*

School of Mechanical Engineering, Pusan Nat'l University

(Received 4 October, 2011; Revised 19 November, 2011; Accepted 29 November, 2011)

Abstract

Previous designs of conventional aerodynamic lenses have a limitation of narrow range of focusable particle size, e.g. 30 to 300nm or 3 to 30nm. To enlarge the focusable size range to 30-3000nm, it is necessary to avoid a significant loss of particles larger than 300nm inside the lenses. From numerical simulations on size-resolved particle trajectories, we confirmed that the traveling losses of such large particles could be avoided only when the radial position of particles approaching the orifice lens was near the lens axis. Hence, we designed the lens system consisting of a converging-diverging nozzle and 7 orifices to fulfill the requirement. In particular, the orifices were aligned in a way that their diameters were descending and ascending to the downstream. As a result, 30-2800nm particles can be focused to the particle beam of 0.2mm or less in radius with above 85% transmission efficiency. Even 10 μ m particles can be focused with 74% of transmission efficiency. .

Keywords : Aerodynamic lens, Nanoparticle focusing, Single Particle Mass Spectrometer

* Corresponding author.
Tel : +82-51-510-2365, Email : donglee@pusan.ac.kr

1. 서 론

다단의 오리피스(Orifice)로 구성되어진 공기역학 렌즈는 높은 전송효율로 나노 크기의 입자를 집속시켜 에어로졸 입자 빔을 생성하는 장치로 Liu et al.^(1,2)에 의해 최초 제안되었으며, 특별한 전기적 제어장치 없이 제작이 용이한 기계적 장비로써의 장점을 가지고 있다. 공기역학렌즈를 이용한 나노입자 집속 기술은 에어로졸 질량분석기(Aerosol Mass Spectrometry)의 효과적인 유입부(Aerosol Inlet)⁽³⁻⁵⁾, 마이크로 패터닝과 물질 합성^(6,8), 바이오 물질 조성의 측정용 유입부⁽⁹⁾등의 다양한 응용분야를 가지고 있다.

최초의 에어로졸 입자 빔은 모세관⁽¹⁰⁾, 오리피스^(11,12), 수축형 노즐⁽¹³⁾등을 통하여 생성되었으나, 특정한 크기의 입자만을 집속시킬 수 있는 한계가 있다. 3-5개의 내경이 다른 평행형 오리피스를 원통형 관에 적절한 간격으로 삽입하여 만들어진 공기역학렌즈는 훨씬 넓은 크기범위의 나노 입자를 높은 전송효율로 집속시킬 수 있었다.⁽¹²⁾ 그러나, 현재까지 제안된 대부분의 공기역학렌즈 디자인으로는^(14,15) 약 10배의 크기범위의 입자들만 집속가능하다. 선행 연구자들의 공기역학렌즈의 시뮬레이션 결과를 살펴보면, Liu et al.은 25~250nm⁽¹⁾, Zhang et al.은 60~600nm⁽¹⁶⁾, Wang et al.은 3~30nm⁽¹⁷⁾, Lee et al.은 30~300⁽⁵⁾ 및 5~50nm⁽¹⁸⁾와 같이 다양한 입자 직경 구간에서 집속 가능 하지만, 그 크기의 비가 10배 내외인 한계점을 가진다.

집속 가능한 입자 크기 구간이 제한되는 것은 그 구간의 상한과 하한에 대해 서로 다른 원인이 있다. 먼저 하한의 경우, 즉 집속 하고자 하는 입자가 10 nm 이하로 매우 작을 경우, 집속에 필요한 입자 관성 효과가 작을 뿐만 아니라, 확산에 의해 입자가 발산하여 집속이 어려워진다. 이러한 어려움을 극복하기 위해 최근 운반가스를 공기대신 헬륨을 사용하거나⁽¹⁷⁾, 공기역학렌즈의 기하학적 형상을 수축발산형으로 변경하는⁽¹⁸⁾ 방법 등이 제안되었다.

두 번째 입자 집속구간의 상한은 위와는 반대로 입자의 관성효과가 지나치게 크기 때문에 제한된다. 즉, 입자의 스톡스 수(St)가 10이상으로 지나치게 커져서 입자의 관성 충돌로 인한 전송손실이 급격히 증가한다. 그러나 이러한 큰 입자의 손실은 렌즈 디

자인에 상세히 고려되지 않았으며, 해결방안에 대한 보고도 알려진 바 없다. 특히 입자집속 구간을 확대하기 위해서는 그 크기의 상한을 확대하는 것이 필요하기에, 본 연구에서는 큰 스톡스 수의 입자 거동과 손실 방지에 초점을 맞추었다.

공기역학렌즈 내부에서 큰 스톡스 수의 입자는 오리피스 전면부에서 충돌 손실되거나 오리피스에서 과도집속(overfocusing)된 다음 스페이서(spacer) 또는 다음 단 오리피스 전면부에서 충돌 손실된다. 또한 렌즈 내부에서 입자가 오리피스로 접근할 때 입자의 반경방향 위치가 렌즈의 중심축에서 멀어질 때 속도의 차이에 기인하는 지역적인 스톡스 수(local stokes number)^(12,15)가 달라져서 입자의 충돌 손실은 심각해진다. 따라서 본 연구에서는 오리피스 배치를 두 단계(오리피스 직경이 감소한 후 증가하는)로 하여, 첫 단계에서는 큰 입자의 입사위치를 렌즈 중심축 근방으로 이동시키고, 두 번째 단계에서 입자의 스톡스 수를 감소시켜 입자의 관성충돌을 저감시키고자 하였다. 30nm-3 μ m의 광범위 입자를 최소 손실로 집속하는 것을 디자인 목표로 하고, 수치 해석을 통하여 검증한다.

실제 공기역학렌즈는 에어로졸 질량 분석기의 에어로졸 유입부로 널리 사용되고 있으며, 상용 제품인 TSI사의 Series 3800 ATOFMS 모델의 경우 30nm-3 μ m의 에어로졸 입자를 질량 분석하기 위하여서는 2개의 공기역학렌즈 모델을 교체하여야만 가능하다.⁽¹⁹⁾ 이는 광범위의 크기의 입자를 한번에 질량 분석할 수 없을 뿐만 아니라, 고진공 상태를 요구하는 에어로졸 질량분석기의 특성상 공기역학렌즈의 교체 후 실사용 조건을 만족하려면 상당한 시간을 요구하는 심각한 문제를 의미하고, 본 연구에서 제안된 디자인이 성공적으로 동작한다면 이러한 문제를 해결할 수 있게 된다. 또한 본 연구의 아이디어를 1-10의 스톡스 수의 입자를 선택적으로 투과시키는 버츄얼 임팩터(virtual impactor)⁽²⁰⁾에 적용하면, 투과하는 입자 크기 영역을 훨씬 확대 가능할 것으로 기대한다.

2. 수치해석 방법과 가정조건

공기역학렌즈내의 공기의 유동과 입자의 거동은

상용 CFD프로그램인 FLUENT(version 6.2.16)을 이용하였다. 입자의 수 농도가 낮고, 입자 직경이 작기 때문에 입자 상호간의 작용과 입자가 유체의 유동에 영향을 주지 않는다고 가정한다. 공기유입부의 유량은 0.1mm 직경의 임계 오리피스에 의해 100sccm(2.04x10⁶kg/s)으로 제한되어 입구의 압력은 ~180Pa (1.36torr)로 유지된다. 렌즈의 출구부의 압력은 에어로졸 질량분석기의 동작조건인 10³torr로 가정한다.^(3,5,18) 또한 유체유동은 정상상태, 압축성, 층류, 점성유동으로 가정한다.^(5,16-18) 입자는 구형으로 간주하고 표준입자(1g/cc)의 밀도를 가진다고 가정한다.

입자의 거동은 입자의 초기속도와 항력(drag force)에 의해 궤적이 결정되며, 입자가 구형으로 간주되어 양력(lift force)은 무시하였다. 본 연구에서는 고려된 입자의 직경은 30nm이상이기 에 브라운 확산 효과를 고려하지 않았다. 참고로 선행연구에서 브라운 운동의 유무에 의한 궤적 직경의 오차가 30nm는 7%, 50nm는 2%이내로 크지 않았음을 고려하였다.^(17,18) 입자의 거동에서 미끄럼 보정 계수(slip correction factor)는 압력에 따라 변화하므로 UDF(user define function)를 사용하여 공기역학렌즈내부의 연속적인 압력변화에 따라 변화되도록 하였다.^(17,18) 질량분석기 유입부로 사용하기 위하여 공기역학렌즈의 내경(R)은 12.5mm로 간주하였다.

3. 결과 및 토의

3.1 입자의 초기 반경 방향 위치와 입자 관성 충돌 손실

오리피스로 접근하는 입자의 반경 방향의 위치는 입자가 오리피스를 통과한 후 그 집속 정도, 즉 수축율과 투과율에 큰 영향을 미친다.^(1,12,15) 이런 특성 때문에 선행 연구자들은 렌즈 내경 대비 입자의 반경방향 입사위치(r_{pi}/R)를 0.2이하로 제한하여 설계에 반영하였고, 이렇게 제한된 입사 위치의 입자가 최적으로 집속되게 하는 최적 스톡스 수를 이용하여 공기역학렌즈 설계를 하였다.^(1,5,15)

Figs. 1a-c는 입자의 초기 입사위치(r_{pi}/R)가 0.05-0.25로 렌즈의 중심축에 가까운 경우 (근거리 입사)의 입자궤적을 나타낸다. 첫 번째 오리피스에서 입

자가 과다집속되어 렌즈의 중심축을 가로질러 가는 것을 반사시켜 절반의 렌즈에 표시하였음을 알린다. 기존의 렌즈 설계에서 고려된 ‘근거리 입사’의 경우는 모든 스톡스 수에서 첫 오리피스의 전면부에서는 관성충돌 손실이 발생하지 않음을 공통적으로 알 수 있다. 스톡스 수가 10보다 커질 경우 다음 단의 오리피스 전면부에서 관성충돌 손실이 발생하며 그 손실은 스톡스 수의 증가에 비례하여 증가한다. (Figs. 1b-c) 그러나 스톡스 수가 10의 경우에는 후류에서도 수축률이 -1이하로 과다하게 집속되지만 손실은 발생하지 않는 것을 알 수 있다.(Fig. 1a)

반면에 Figs. 1d,e에서 나타낸 것과 같이 초기 입사 위치(r_{pi}/R)가 0.4-0.8로 중심축에서 먼 ‘원거리 입사’의 경우에는 근거리로 입사된 동일한 입자보다 훨씬 심각한 관성충돌 손실을 확실히 알 수 있다. Fig. 1d에서는 $r_{pi}/R=0.5$ 에서 입사된 입자는 첫째 단 오리피스를 통과하지 못하고 관성 충돌이 발생했다. 그런데 중심축에서 더 먼 나머지 세 위치의 입자는 예상과는 달리 오리피스를 통과한 후 렌즈내벽에 충돌하였다. 즉 평균속도에 기반된 스톡스 수보다는 각 위치의 Local 속도에 기반하는 지역적인(local) 스톡스 수가 고려되어야 하며, $r_{pi}/R>0.5$ 의 위치에서는

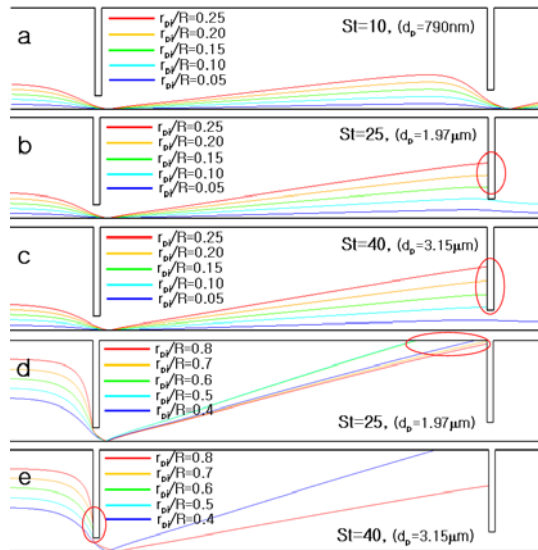


Fig. 1. Stokes number-dependent trajectories of particles approaching an orifice at various local radial positions : (a-c) near the lens symmetric axis and (d-e) far from the axis.

유속이 중심부보다 느려 스톡스 수가 작게 된다. 따라서 관성충돌의 효과가 더 원거리임에도 불구하고 적게 된다.

Fig. 1e는 $r_{pi}/R=0.5-0.7$ 세 입사위치의 입자가 첫째 단 오리피스 벽면에서 관성 충돌하며, 나머지 두 위치의 입자는 과도 집속 후 렌즈 내벽과 둘째 단 오리피스 전면에서 충돌한다. $r_{pi}/R=0.5-0.7$ 의 위치에서의 유속으로 계산된 지역적인 스톡스 수는 예측대로 가장 높았음을 확인하였다. 또한 $r_{pi}/R=0.8$ 과 같이 입사 위치가 더 멀어질 경우, 과도 집속 후 발산각이 오히려 낮아지는 경향은 벽면 근처의 유속이 낮아지면서 지역적인 스톡스 수가 낮아지기 때문이다. 상기 결과는 단일 단(single stage)의 오리피스 및 노즐에서의 입자 관성 충돌에 대한 선행 연구와 유사하다.^(11,12)

대부분의 공기역학렌즈는 유입부에서 출구부로 갈수록 차츰 렌즈의 직경이 작아지고 스톡스 수가 증가하도록 디자인 되어 있다. 이러한 직경감소형 공기역학렌즈에서는 노즐 바로 앞의 마지막 오리피스에서 입자의 스톡스 수가 가장 높게 된다. 따라서 마지막 오리피스로 접근하는 입자들이 Figs. 1a-c에서 처럼 중심축에 충분히 가까이 집속되어야 Figs. 1d,e에서의 심각한 관성충돌 손실을 막을 수 있다. 본 연구에서 목표로 한 집속가능한 최소 입자 직경은 30nm이다. 최대 스톡스 수를 나타내는 오리피스에서 30nm 입자가 0.4의 스톡스 수에 해당되게 렌즈를 설계하여 Wang et al.⁽¹⁵⁾의 최적 스톡스 수 ~0.6보다 낮은 Sub-optimal로 집속 가능하게 하였다. 입자 직경이 30nm에서 3 μ m로 100배 증가할 경우, 동일한

입자에 대한 스톡스 수도 정비례하여 40이 된다. 그러므로 30nm-3 μ m 입자의 집속을 위해서는 최대 스톡스 수인 40에서 입자 손실을 어떻게 최소화 할 것인지가 핵심이 된다. Fig. 1c에서 스톡스 수가 40일 때, $r_{pi}/R \leq 0.05$ 의 반경위치로 입사되는 입자는 관성충돌 손실을 막을 수 있었다. 이를 이용하여 본 연구에서는 공기역학렌즈의 노즐을 제외하고 스톡스 수가 가장 높은 오리피스에서 스톡스 수가 40이 되고 입자의 반경위치(r_{pi}/R)를 0.05이하로 유입되게 설계하였다.

3.2 30nm-3 μ m 입자 집속용 공기역학렌즈

Fig. 2는 30nm-3 μ m 광범위 직경의 입자를 집속하기 위해 설계된 공기역학렌즈 도면이며, 공기역학렌즈 내부에 7개의 오리피스 렌즈와 수축-발산형 노즐로 구성되어 있다. 공기의 유선 패턴으로부터 유체의 수축 팽창 후 완전 발달되는 것을 확인 할 수 있다. 공기역학렌즈의 유입부(mass flow inlet)에서 출구부(pressure outlet)로 가면서 오리피스의 직경이 차츰 감소하여, 4번째 오리피스의 직경이 최소(3.4mm)가 되고 입자의 스톡스 수가 최대값이 된다. 4번째 오리피스 이후에 다시 오리피스 직경이 증가하여, 입자의 스톡스 수가 감소하여 입자의 관성충돌 손실이 최소화 되게 하였다.

Fig. 3은 공기역학렌즈 내에서 운반 가스인 공기의 유속과 압력변화를 나타낸다. 가속을 담당하는 노즐을 제외하면, 4번째 렌즈에서 유속과 압력 변화가 최대가 됨을 확인 할 수 있다.

Table 1에서 오리피스별로 입자 크기에 따라 입자

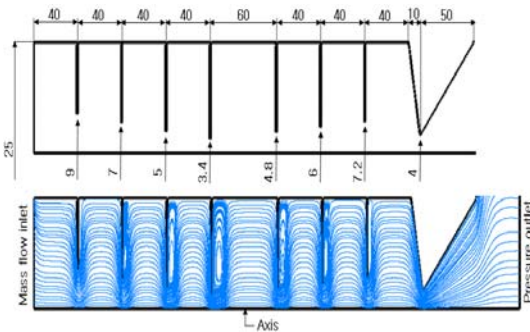


Fig. 2. Schematic of an aerodynamic lens system and gas flow streamlines at Q=100sccm: all numeric values are in unit of mm.

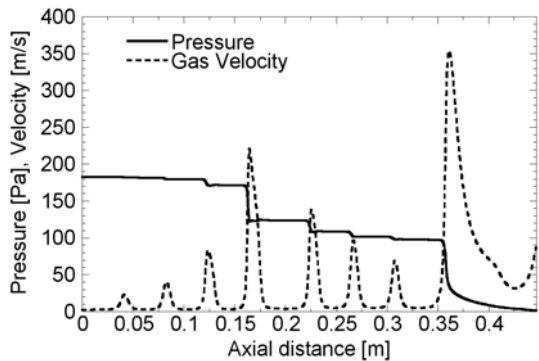


Fig. 3. Air velocity and pressure along the aerodynamic lens axis.

Table 1. Upstream pressure and particle Stokes number(St) at each lens(orifice).

Lens number	1	2	3	4	5	6	7
St of 30nm	0.02	0.04	0.11	0.38	0.26	0.17	0.12
St of 100nm	0.06	0.13	0.36	1.27	0.86	0.57	0.38
St of 500nm	0.30	0.65	1.81	6.35	4.29	2.87	1.92
St of 1 μ m	0.60	1.29	3.63	12.71	8.59	5.74	3.86
St of 3 μ m	1.80	3.88	10.88	38.12	25.77	17.23	11.51
P _{up} [Pa]	182.6	181.5	179.5	171.0	124.0	108.5	101.0

의 스톡스 수를 나타내었다. 각 입자 크기에서 스톡스 수가 증가하다가 다시 감소하며, 4번째 렌즈에서 스톡스 수가 최대가 됨을 확인할 수 있다. 30nm 입자는 스톡스 수 0.38, 3 μ m 입자는 38의 스톡스 수를 가져 3.1절에서 서술한 디자인 포인트 0.4와 40의 스톡스 수(St)에 비슷하다.

선행연구(Wang et al.⁽¹⁵⁾의 Fig.2 참조)를 참조하면, 마하 수(Ma)와 레이놀즈 수(Re)의 변수가 있지만, 대략 $0 < St < 3$ 일 경우에는 집속 전후의 입자 반경위치의 비(r_{pi}/r_{po})로 나타내는 수축률($\eta_c = r_{pi}/r_{po}$)이 -1과 1 사이의 값을 가져 집속이 가능함을 알 수 있다. 이에 비해 $3 < St < 40$ 일 경우에는 $-3 < \eta_c < -1$ 로 집속이 아닌 팽창하는 경향을 보인다. 이를 염두에 두고 Table 1의 결과를 해석하면 다음과 같다. 입자의 크기와 밀도가 공기분자에 근접하여 St수가 0에 근접하더라도 Fig. 2의 유선은 오리피스 전후에서 반경 방향의 위치가 같기 때문에, 입자의 수축률은 $\eta_c \leq 1$ 이 되어 최소한 발산하지는 않는다. Table 1에서 30nm 입자의 경우, 1번 오리피스에서 스톡스 수 0.02는 입자가 아주 미세하게 집속되기 시작하고, 4번 렌즈에서는 sub-optimal 조건으로 입자 빔을 형성한 후, 5~7번 렌즈를 거치면서 여전히 $0.1 \leq St \leq 0.3$ 으로 계속적으로 집속시키게 된다.

1 μ m와 3 μ m 입자의 경우, 입자의 스톡스 수(St)가 최대인 4번 렌즈에서는 η_c 가 -2와 -3사이의 값을 가져서 입사된 반경 방향 위치보다 2-3배 중심축에서 멀리 떨어진 위치까지 발산하게 되지만, 그 다음 단의 오리피스를 통과하면서 직경 감소에 따라 St가 낮아지고 더 이상의 발산은 최소화 될 것으로 예상된다. 즉 오리피스 직경이 차츰 증가하는 5-7렌즈는 입자의 St를 차츰 낮추어 관성력을 줄일 뿐만 아니라, St가 가장 높은 4번 렌즈에서 큰 발산각을 가지

면서 과도 집속하는 입자를 노즐까지 중심 축과 평행하게 이동시켜 노즐 전면벽에서 발생하는 입자의 관성 충돌을 억제시킨다.

동일한 위치에서 입사되는 다양한 크기의 입자의 궤적을 Fig. 4에 나타내어 비교하였고 전술한 바와 같은 입자의 거동을 확인하였다. 즉 4번 렌즈에서 최적 집속되는 입자 크기는 50nm (St~0.6)이며, 30nm 입자는 불완전하게 집속되나 5~7번 렌즈를 통과하면서 완전 집속된다. 1 μ m와 3 μ m 입자는 4번 렌즈에서 과도 집속으로 발산하여, 입사 위치보다 발산 후 위치는 중심축에서 2-3배 팽창하였지만, 평행하게 노즐 방향으로 진행하여 손실없이 통과한다.

3.3 공기역학렌즈 시뮬레이션 성능 평가

Fig. 5는 공기역학렌즈의 유입부에서 각 입자의 크기별로 반경 방향 입사 위치를 다양하게 하여 모사한 입자들의 궤적을 나타낸다. 예측된 바와 같이 노즐을 통과하고 생성된 입자들의 입자 빔이 집속

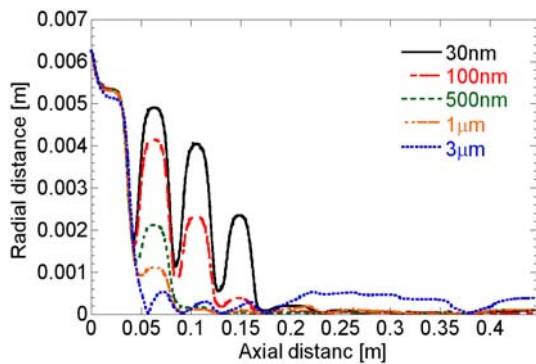


Fig. 4. Size-resolved particle trajectories in same particle initial radial position at inlet of an aerodynamic lens.

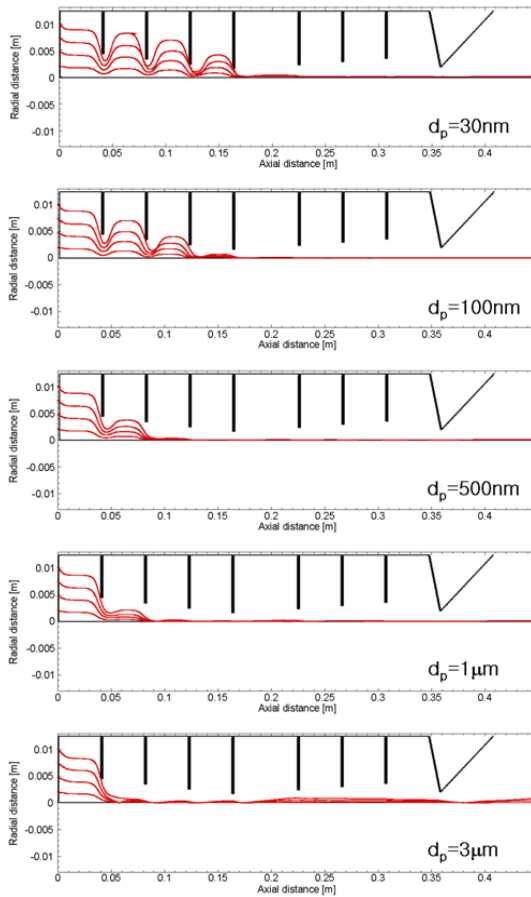


Fig. 5. Size-resolved particle trajectories in an Aerodynamic lens system.

되어 있음을 확인 할 수 있다.

Fig. 6에서는 Fig. 5에서 집속된 입자빔의 반경을 크기별로 구하여 선행연구인 Zhang et al.(2004)⁽¹⁶⁾와 Lee et al.(2008)⁽⁵⁾에서의 모사 결과와 비교하였다. 본 연구에서는 30nm에서 2.8 μ m까지는 입자 빔 반경이 0.2mm 이내로 우수한 집속 능력을 보였고, 3 μ m에서는 0.7mm로 과도 집속 후 발산의 영향으로 다소 증가한 결과값을 보였다. 4 μ m에서 입자 빔 반경이 최대값을 가지고, 그 후 입자 직경이 커질수록 입자 빔 반경이 줄어 들었다. 4 μ m이상의 입자는 4번 렌즈에서 과도 집속 후 발산각이 커지면서 입자 빔 가장자리의 입자들이 관성 충돌로 더욱 손실되면서 입자 전송률은 낮아짐과 동시에 입자 빔 반경 자체는 오히려 줄어들음을 확인 할 수 있었다.

Fig. 7에서 입자의 크기별 투과효율을 본 연구결과와 선행연구 Liu et al.(2007)⁽²¹⁾, Janye et al.(2000)⁽²²⁾, Zhang et al.(2004)⁽¹⁶⁾의 결과와 비교하였다. 본 연구결과에서는 30nm에서 1.5 μ m까지는 100%에 근접한 전송효율을 보이고, 3 μ m에서는 85%, 5 μ m에서는 80%, 심지어 10 μ m에서도 74%의 입자 전송효율을 보임으로써, 기존의 공기역학렌즈 디자인에서 제시된 입자의 전송율을 현격히 확대한 입자의 투과효율을 보인다. 특히 Fig. 6에서 100nm이상의 입자 크기에서는 Zhang et al.의 공기역학렌즈의 입자 빔 반경이 본 연구결과보다 더 작아보이지만, 이는 Fig. 7에서 보인 바와 같이 600nm을 넘어서면 급격히 관성손실이 발생하여 입자빔의 Cut off에 의해 빔이 집속된 것처럼 보이는 것을 강조하고자 한다.

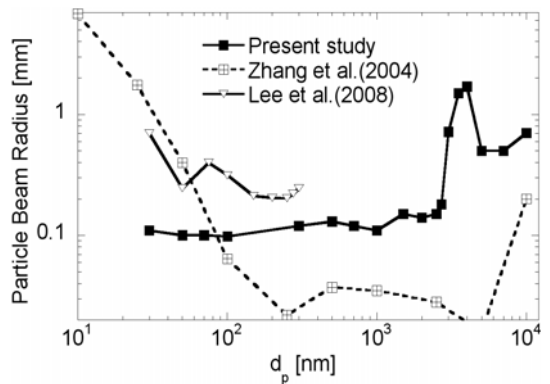


Fig. 6. Particle beam radius as a function of particle size.

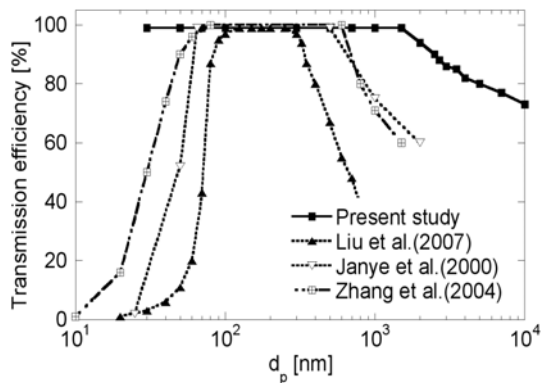


Fig. 7. Transmission efficiency of particles as a function of particle size.

4. 결론

입자의 큰 St에 의해 관성 충돌 손실로 기인한 기존의 공기역학렌즈는 집속 가능한 최소 입자크기와 최대 입자 크기의 크기비가 10배 이내인 한계를 가지고 있었다. 본 연구에서는 입자의 초기 반경 방향 입사 위치에 따라 입자의 관성 충돌이 다르게 발생할 수 있음과, 렌즈의 직경이 감소 후 증가하는 즉 입자의 스톱스 수가 증가 후 감소하는 렌즈의 배열을 이용하여 새로운 타입의 공기역학렌즈를 설계하였다. 이러한 설계는 렌즈를 통과하는 큰 스톱스 수 입자의 관성 충돌 손실을 저감하여, 30nm에서 3 μ m의 구형 입자를 85%이상의 높은 투과효율로 집속할 수 있음을 보이며, 10 μ m 입자도 74%의 투과효율로 집속가능하여 에어로졸 질량 분석기의 효과적인 입구 유입부의 역할이 기대된다.

후 기

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었음

참 고 문 헌

- Liu, P., Ziemann, P. J., Kittelson, D. B. and McMurry, P. H., 1995a, "Generation Particle Beams of Controlled Dimensions and Divergence: I. Theory of Particle Motion in Aerodynamic Lenses and Nozzle Expansions," *Aerosol Sci. Technol.*, Vol. 22, pp. 293-313.
- Liu, P., Ziemann, P. J., Kittelson, D. B. and McMurry, P. H., 1995b, "Generation Particle Beams of Controlled Dimensions and Divergence: II. Experimental Evaluation of Particle Motion in Aerodynamic Lenses and Nozzle Expansions," *Aerosol Sci. Technol.*, Vol. 22, pp. 314-324.
- Lee, D., Park, K. and Zachariah, M. R., 2005, "Determination of size distribution of polydisperse nanoparticles with Single Particle Mass Spectrometry: The role of Ion Kinetic Energy," *Aerosol Sci. Technol.*, Vol. 39, pp. 162-169.
- Lee, D., Miller, A., Kittelson, D. and Zachariah, M. R., 2006, "Characterization of metal-bearing diesel nanoparticles using single particle mass spectrometry," *J. Aerosol Sci.*, Vol. 37(1), pp. 88-110.
- Lee, K.-S., Cho, S.-W. and Lee, D., 2008, "Development and experimental evaluation of aerodynamic lens as an aerosol inlet of single mass spectrometry," *J. Aerosol Sci.*, Vol. 39, pp. 287-304.
- Dong, Y., Bapat, A., Hilchie, S., Kortshagen, U. and Campbell, S. A., 2004, "Generation of Nano-Sized Free Standing Single Crystal Silicon Particles," *J. Vacuum Sci. & Technol. B: Microelectronics and Nanometer Structures*, 22(4), pp. 1923-1930.
- Fonzo, F. D., Gidwani, A., Fan, M. H., Neumann, D., Iordanoglou, D. I. Heberlein, J. V. R., McMurry, P. H., Girshick, S. L., Tymiak, N., Gerberich, W. W. and Rao, N. P., 2000, "Focused Nanoparticle-Beam Deposition of Patterned Microstructures," *Appl. Phys. Lett.*, 77(6), pp. 910-912.
- Qi, L., MuMurry, P. H., Norris, D. J. and Girshick, S. L., 2010, "Micropattern Deposition of Colloidal Semiconductor Nanocrystals by Aerodynamic Focusing," *Aerosol Sci. Technol.*, Vol. 44, pp. 55-60.
- Harris, W. A., Reilly, P. T. A. and Whitten, W. B., 2006, "Aerosol MALDI of peptides and proteins in an ion trap mass spectrometer: Trapping, resolution and signal-to-noise," *Int. J. Mass Spectrom.*, 258, pp. 113-119.
- Murphy, W. K. and Sears, G. W., 1964, "Production of Particulate Beams," *J. Appl. Phys.*, Vol. 35, pp. 1986-1987.
- Das, R. and Phares, D. J., 2004, "Expansion of an ultra-fine aerosol through a thin-plate orifice," *J. Aerosol Sci.*, Vol. 35, pp. 1091-1103.
- Deng, R., Zhang, X., Smith, K. A., Wormhoudt, J., Lewis, D. K. and Freedman, A., 2008,

- “Focusing Particle with Diameters of 1 to 10 Microns into Beams at Atmospheric Pressure,” *Aerosol Sci. Technol.*, Vol. 42, pp. 899-915.
- Chen, D. R. and Pui, Y. H., 1995, “Numerical and Experimental Studies of Particle Deposition in a Tube with a Conical Contraction-Laminar Flow Regime,” *J. Aerosol Sci.*, Vol. 26(4), pp. 563-574.
- Wang, X. and McMurry, P. H., 2006a, “An Experimental Study of Nanoparticle Focusing with Aerodynamic Lenses,” *Int. J. Mass Spectrom.*, Vol. 258, pp. 30-36.
- Wang, X. and McMurry, P. H., 2006b, “A Design Tool for Aerodynamic Lens Systems,” *Aerosol Sci. Technol.*, Vol. 40, pp. 320-334.
- Zhang, X., Smith, K. A., Worsnop, D. R., Jimenez, J. L., Jayne, J. T., Kolb, C. E., Morris, J. and Davidovits, P., 2004, “Numerical Characterization of Particle Beam Collimation: Part II Integrated Aerodynamic-Lens-Nozzle System,” *Aerosol Sci. Technol.*, Vol. 38, pp. 619-638.
- Wang, X., Gidwani, A., Girshick, S. L. and McMurry, P. H., 2005, “Aerodynamic Focusing of Nanoparticles: II. Numerical Simulation of Particle Motion Through Aerodynamic Lenses,” *Aerosol Sci. Technol.*, Vol. 39, pp. 624-636.
- Lee, K.-S., Kim, S. and Lee, D., 2009, “Aerodynamic focusing of 5-50nm nanoparticles in air,” *J. Aerosol Sci.*, Vol. 40, pp. 1010-1018.
- TSI, 2004, Product information of Series 3800 Aerosol Time-of-Flight Mass Spectrometers with Aerodynamic Focusing Lens Technology, www.tsi.com.
- Hari, S., McFarland, A. R. and Hassan, Y. A., 2007, “CFD Study on the Effects of the Large Particle Crossing Trajectory Phenomenon on Virtual Impactor Performance,” *Aerosol Sci. Technol.*, Vol. 41, pp. 1040-1048.
- Liu, P. S. K., Deng, R., Smith, K. A., Williams, L. R., Jayne, J. T., Canagaratna, M. R., Moore, K., Onasch, T. B., Worsnop, D. R. and Deshler, T., 2007, “Transmission Efficiency of an Aerodynamic Focusing Lens System: Comparison of Model Calculations and Laboratory Measurement for the Aerodyne Aerosol Mass Spectrometer,” *Aerosol Sci. Technol.*, Vol. 41, pp. 721-733.
- Jayne, J. T., Leard, D. C., Zhang, X., Davidovits, P., Smith, K. A., Kolb, C. E. and Worsnop, D. R., 2000, “Development of an Aerosol Mass Spectrometer for Size and Composition Analysis of Submicron Particles,” *Aerosol Sci. Technol.*, Vol. 33, pp. 49-70.