

환경입자제어용 관성충돌기의 충돌판 냉각에 따른 효율곡선의 변화

이병욱* · 김상수**

The effect of cooling an impaction plate on impactor performance

Byung Uk Lee(Graduate School, KAIST) and Sang Soo Kim(KAIST)

Key Words : Impactor(관성충돌기, 임팩터), Thermophoresis(열영동), Aerosol(에어로졸, 미세입자)

Abstract

Recently, as the environmental pollution becomes an important issue, aerosols which are the main components of the atmospheric pollution become the subject of a lot of researches. An impactor is a kind of sampling and measuring equipment for aerosols since 1970s. The impactor uses coating materials to obtain high performance. However, there are a lot of situations when coating materials are not available and in this case the classification efficiency of the impactor decreases significantly. In this study, the impaction plate of the impactor is cooled, therefore the impactor performs efficiently when coating materials are not available.

1. 서 론

대기오염문제에 최근 많은 관심이 집중되면서, 대기오염물질 중의 하나인 미세먼지에 대해 많은 연구가 진행되고 있다. 미세먼지라 함은 다른 말로 환경입자(aerosol)라고 하는 데, 공기중에 부유되어 있는 직경이 $10\mu\text{m}$ 이하인 입자 혹은 먼지들을 말한다. 이 환경입자들은 그 자신이 대기오염의 원인이기도 하지만, 다른 대기오염의 물질들을 이 환경입자 형태로 바꾸어 제어할 수 있다는 데에 그 중요성이 더 크다.

본 연구는 이러한 환경입자의 제어기술가운데 한가지로 현재 학계 및 업계에서 많이 사용되고 있는 관성충돌기, 즉 임팩터(impactor)에 관한 연구이다.

임팩터란 환경입자의 관성을 이용해서 환경입자를 공기역학적 입경별로 분류하는 장치로서 환경입자를 연구하는 사람들 사이에서 연구가 진행되다가 Marple and Lui(1974)⁽³⁾에 의해 좀더 자세히 그 기능과 효과가 분석되었다. 그들은 임팩터의 노즐과 레이놀즈 수, 노즐과 충돌판사

이의 거리, 노즐의 길이등과 임팩터의 분리효율 특성에 대해서 연구하였다. 후에 Rader and Marple(1985)⁽⁴⁾은 임팩터내에서의 환경입자의 거동 및 그 분리효율에 관해 수치해석을 보여주어서 임팩터의 설계에 큰 도움을 주었다.

종래의 임팩터를 개량해서 새로운 임팩터의 개발도 최근에 관심을 모으고 있다. Biswas and Flagan(1988)⁽¹⁾은 트랩임팩터를 개발하여 충돌판 대신에 트랩을 사용해 환경입자들을 포집하도록 하였다. 최낙준등(1999)⁽⁵⁾에 의해 개발된 변형 충돌판 임팩터의 경우는 종래의 임팩터에서 코팅제를 사용하지 못하는 경우에 대해서 임팩터의 관성효과를 증가시켜 효율을 증가시키자는 취지에서 연구가 되었다. 임팩터에서 충돌판에 바르는 코팅제를 사용하지 못하는 경우는 고온에서 샘플링(sampling)하는 경우와 생물입자(bioaerosol) 샘플링의 경우로 볼 수 있다.

고온에서 샘플링하는 경우는 코팅제의 점성이 약해져서 코팅제가 흘러내리거나, 기체로 증발해 버리기 때문에 코팅제가 그 역할을 제대로 수행할 수 없다. 생물입자의 샘플링의 경우에는 생물입자가 코팅제에 의해 오염(contamination)될 수 있으므로 코팅제를 사용할 수 없게 된다.

본 연구에서는 위와 같이 코팅제를 사용할 수 없는 상황에서 충분한 환경입자의 분리제어를 얻기위한 임팩터의 개발의 일환으로서 임팩터의

* 한국과학기술원 대학원

** 한국과학기술원

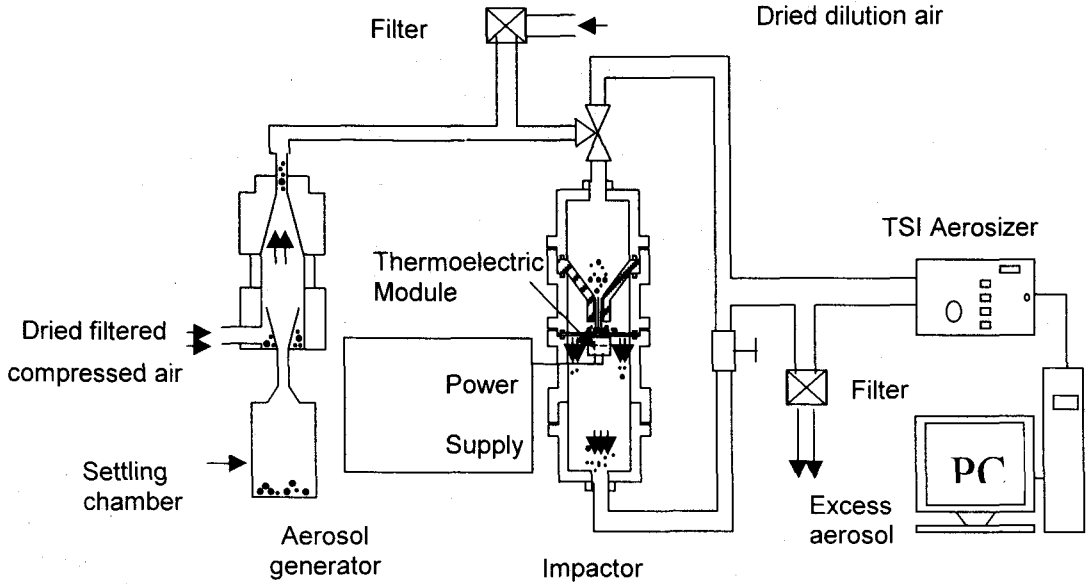


Fig. 1. Schematic of the experimental

충돌판을 냉각시키는 방법을 선택하였다. 그래서, 임팩터의 충돌판을 냉각시켰을 경우에 초래되는 분리효율 곡선의 변화를 조사하여 그 성능향상을 확인하였다.

2. 실험 방법

2.1 임팩터의 설계

본 실험에서 사용되는 임팩터는 종래에 많이 사용되는 전형적 임팩터로서, Marple et al.(1974)⁽³⁾의 논문을 참조하여 설계되었다. 노즐 출구의 제트의 직경, W 는 4mm 이며, 노즐 목의 길이, T 는 3.875W 이고, 제트와 충돌판사이의 거리 S 는 W 와 같이 4mm 이다.

본 연구의 특징인 임팩터의 충돌판의 냉각은 열전시스템을 통해 하였다. 열전시스템이란 열전소자로 구성된 것으로서, 전기를 걸어주면 양면사이에 일정한 온도차를 유지시켜주는 시스템을 말한다. 이 열전소자를 임팩터의 충돌판 뒷면에 부착하여 충돌판의 온도를 떨어뜨렸다.

충돌판의 온도는 충돌판에 연결된 센서(thermocouple)을 이용하여 실험을 하면서 실시간 확인 하였다.

2.2 실험장치의 구성

Fig. 1 에서는 본 연구를 수행하기 위한 실험장치의 구성을 보여주고 있다. Fig.1 을 보면 필터를

통과한 압축 공기는 환경입자 발생기로 들어가서 환경입자를 발생시킨다. 본 실험에서는 비산재입자(flyash)를 사용하였다. 환경입자 발생기에서 발생된 환경입자는 임팩터에 들어가게 된다. 임팩터에 들어가기 전, 즉 임팩터 입구에서의 환경입자의 크기분포 및 농도와 임팩터 통과한 후, 즉 임팩터의 출구에서의 환경입자의 농도와 크기분포를 에어로사이저(Aerosizer)를 통해 측정한다. 임팩터 입구와 출구에서의 환경입자의 크기분포 및 농도의 측정을 통해 임팩터의 분리효율 곡선을 얻고 임팩터의 성능을 평가할 수 있다. 열전시스템에 의해 조절되는 충돌판의 온도는 상온이 섭씨 25도 정도인 상태에서 섭씨 -2도에서 125도까지 변화를 주었다. 충돌판의 온도를 전기의 극성만 바꾸면 상온보다 올릴 수도 있기 때문에 비교실험을 위해서 충돌판의 가열도 실험을 하였다.

본 연구에서 레이놀즈수(Reynolds number, Re)를 다음과 같이 정의 하여 사용하였다.

$$Re = \rho W V_0 / \mu, \quad (1)$$

여기에서 ρ 는 사용유체의 밀도, 여기서는 공기의 밀도, μ 는 공기의 점도, 그리고 V_0 는 노즐을 통과하는 평균 유속을 말한다. 본 실험에서는 레이놀즈수(Re)를 임팩터 실험에서 많이 사용하는 3300 으로 유지하고 실험을 하였다. 본 연구에서 사용한 입자인 비산재입자(flyash)의 밀도는 $2.57g/cm^3$ 이다.

3. 결과

본 연구의 실험의 결과는 집진효율(the collection efficiency)과 스톡스수(\sqrt{St})로 표현된다. 집진효율이라 함은 입액터로 들어온 입자의 크기분포 및 농도와 입액터를 통과해 나간 입자의 크기분포 및 농도의 비교를 통해 구한 것으로서, 충돌판에 충돌되어 포집된 환경입자의 비율을 나타낸다. 집진효율이 1 이면 모두 충돌되어 부착된 것이고, 집진효율이 0 이면 모두 충돌하지 않고 유동을 따라 통과해 나간 것이다. 스톡스수 (Stokes number, St)는 다음과 같이 정의된다.

$$\sqrt{St} = \sqrt{\frac{\rho_p D_p^2 V_0 C}{9\mu W}} \quad (2)$$

여기서 ρ_p 는 환경입자의 밀도, D_p 는 환경입자의 직경, C 는 미끄럼보정계수(the slip correction factor)을 뜻한다. 위 식에서 볼 수 있듯이 스톡스수는 입액터에서 환경입자가 가지는 관성의 크기를 나타내는 변수로 생각 할 수 있다.

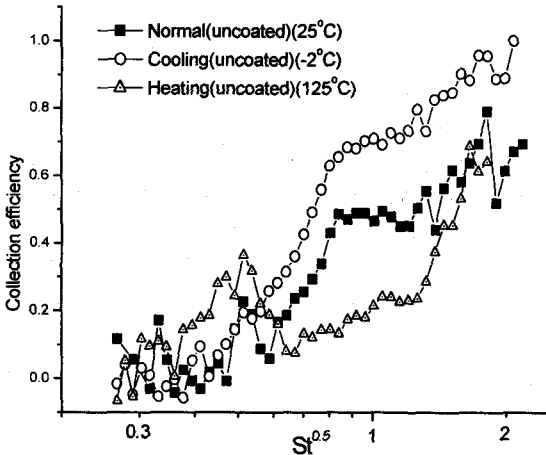


Fig. 2. The collection efficiency curves with heating and cooling the impaction plate.

Fig. 2 는 연구결과의 하나로서 분리효율곡선을 보여주고 있다. 분리효율곡선은 집진효율과 스톡스수로서 표현되고 있다. 본 실험조건에서는 전체적으로 코팅제를 사용하지 않은 충돌판을 사용하였다. 코팅제를 사용하지 않고 충돌판의 온도만을 조절하여 실험조건을 달리 하였다.

코팅제를 사용하지 않은 상온 실험의 경우에는 그 분리효율이 좋지 않으며, 특히 스톡스수(\sqrt{St})가 큰 영역에서 집진효율이 낮은 것을 볼 수 있다. 이는 입자가 충돌판에 충돌한 후 코팅제가 없으면

로 다시 되튀김 현상이 증가하여 발생한 현상으로 생각된다. 코팅제를 사용하지 않고 충돌판을 섭씨 -2 도로 냉각시킨 경우는 실험결과를 보면 집진효율이 상온에 비해 증가하며 분리효율곡선의 기울기가 증가하고 입액터의 분리효율성능이 좋아짐을 확인할 수 있었다. 충돌판을 가열한 경우에는 충돌판 온도를 섭씨 125 도정도로 맞추었고, 이 경우에는 Fig.2 에서 보는 것 처럼 불안정한 효율곡선을 보여주었다. 그래서, 충돌판을 가열한 경우에는 입액터가 그 분리기능을 제대로 하지 못함을 알 수 있었다.

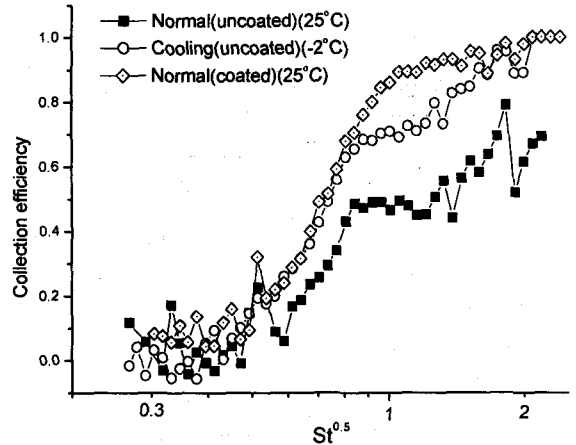


Fig.3 The collection efficiency curves

위의 결과와 코팅제를 사용해서 실험한 결과와의 비교가 Fig.3 에 나타나 있다.

Fig.3 에서는 앞에서 실험했던 코팅제를 사용하지 않고 충돌판의 온도를 낮추지 않은 것과 낮은 것 그리고 코팅제를 사용한 실험결과를 차례로 보여준다. 코팅제를 사용한 실험결과는 Fig.3 에서 볼 수 있듯이 좋은 분리효율 성능을 나타내며 입액터의 성능을 잘 나타내준다. 현재 대부분의 일반적으로 사용되는 입액터는 이러한 조건에서 사용된다. 코팅제를 사용하지 않고 상온에서 실험을 한 경우는 앞에서도 볼 수 있듯이 입액터의 분리 성능을 잘 나타내 주고 있지 못하나, 코팅제를 사용하지 않고 냉각시킨 경우는 코팅제를 사용한 경우와 거의 마찬가지로의 분리효율을 보여주었다. 이 결과는 충돌판을 냉각시키는 것은 코팅제를 사용할 수 없는 상황에서 입액터의 분리성능을 향상시킨다는 것의 확인이 된다.

4. 토의

실험결과에서 볼 수 있듯이 충돌판을 냉각시킨

경우에 임팩터의 집진효율이 증가되며, 임팩터의 분리효율곡선이 기울기가 급해짐을 알 수 있다. 반대로 충돌판을 가열한 경우는 분리효율곡선이 불안정해지면서 임팩터의 분리성능이 현저히 떨어짐을 알 수 있었다. 이러한 현상은 열영동이라는 환경입자가 가지는 운동학적 특성으로서 설명할 수 있다. 열영동 현상이라는 것은 환경입자가 유체의 흐름에 관계없이 주위의 온도에 의해 영향을 받아서 이동하는 현상으로서 고온에서 저온쪽으로 환경입자가 이동하는 현상을 말한다. 충돌판을 냉각시킨 경우는 충돌판부근에서 유체의 속도가 거의 소멸되면서 온도차에 의한 열영동효과로 인해 환경입자에 충돌판으로 향하는 열영동힘이 가해져서 환경입자들이 더 많은 양이 부착되고, 부착되어도 되튀김현상이 줄어드는 것으로 설명될 수 있다.

충돌판을 가열한 경우에는 충돌판주위에서 자연대류현상이 발생하게 되므로 유동이 불안정해지고 그에 따라 부유된 환경입자가 임팩터노즐에서 유동하는 대로 이동하지 않게 된다. 게다가 열영동현상에 의해 가열된 충돌판 주위에서 환경입자가 밀려나는 현상을 보이므로 충돌판에 환경입자가 제대로 집진되지 않는다. 따라서, 환경입자의 제어가 어려워 지고 임팩터의 분리성능이 불안정하게 되는 것으로 생각된다.

이러한 열영동현상에 대해서는 Lee and Kim(2001)⁽²⁾의 연구에서 다루었는데, 상온보다 낮은 영역에서 환경입자에 미치는 열영동 효과가 현재 기존의 이론식보다 더 크다는 것을 알 수 있다.

5. 결론

임팩터의 충돌판의 온도를 냉각했을 때의 임팩터의 성능에 대하여 실험을 해 보았다. 그리고 코팅제를 사용했을 때의 성능과 비교해 보았다. 그래서, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 코팅제를 사용할 수 없는 조건에서 임팩터의 충돌판을 냉각시킬 경우 코팅제를 사용했을 때 정도의 분리효율곡선을 얻을 수 있었다.
2. 임팩터의 충돌판을 가열한 경우에는 임팩터가 분리성능을 거의 보여주지 못했다.
3. 충돌판 주변의 열영동효과가 이러한 결과를 설명할 수 있다.

후 기

본 연구는 과학기술부에서 지원하는 국가지정 연구실사업(에너지 환경문제 해결을 위한 미세입자 제어기술) 과 교육인적자원부에서 지원하는 두뇌한국 21 사업에서 연구비지원을 받았습니다. 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1)Biswas, P. and Flagan, R.C. 1988, The particle trap impactor. *J. Aerosol Sci.* **19**,113-121.
- (2)Lee, B.U., & Kim, S.S. 2001, Thermophoresis in the cryogenic temperature range. *J. Aerosol Sci.* **32**, 107-119.
- (3)Marple, V.A., & Liu, B.Y.H. 1974, Characteristics of laminar Jet impactors. *Environ. Sci. Technol.* **8**, 648-654.
- (4)Rader, D.J., & Marple, V.A. 1985, Effects of ultra-Stokesian drag and particle interception on impaction characteristics. *J. Aerosol Sci.* **4**, 141-156.
- (5)최낙준,박석주,김상수 1999, 관성충돌판의 Cavity 각도 변화에 대한 관성충돌기 효율곡선에 관한 실험적 연구. *대한기계학회논문집 B 권*,제 23 권 제 12 호 pp.1510-1518.