

화력발전소 굴뚝 미세먼지 측정을 위해 개발한 이젝터-다공튜브 희석장치의 희석비 검증

신 동 호^{1,3)} · 김 영 훈¹⁾ · 서 현 수¹⁾ · 홍 기 정¹⁾ · 김 학 준¹⁾ · 김 용 진¹⁾ ·
한 방 우^{1,*} · 이 가 영²⁾ · 천 성 남²⁾ · 황 정 호³⁾

¹⁾전한국기계연구원 환경시스템연구본부,

²⁾한국전력공사 전력연구원 청정발전연구소, ³⁾연세대학교 기계공학부

(2019년 7월 31일 투고, 2019년 9월 17일 수정, 2019년 9월 17일 게재확정)

Verification of dilution ratio of the newly developed ejector-porous tube diluter for measurement of fine dust in coal-fired power plant stack

Dongho Shin^{1,3)} · Young-Hoon Kim¹⁾ · Keejung Hong¹⁾ · Hak-Joon Kim¹⁾ · Yong-Jin Kim¹⁾ ·
Bangwoo Han^{1,*} · Ga-Young Lee²⁾ · Sung-Nam Chun²⁾ · Jungho Hwang³⁾

¹⁾Department of Environment Machinery, Korea Institute of Machinery & Materials

²⁾Korea Electric Power Research Institute, ³⁾Mechanical Engineering, Yonsei University

(Received 31 July 2019; Revised 17 Sep 2019; Accepted 17 Sep 2019)

Abstract

The exhaust emissions from coal-fired power plants have received much attention because coal-fired power plants are the one of the largest sources of particulate matter (PM) emissions in South Korea. To measure the PM₁₀ and PM_{2.5}, we developed the novel diluter which is comprised of ejector and porous tube in series. The dilution ratio must be defined to calculate particle concentrations of the sampled air as well as to probe match for the isokinetic sampling. For this reason, we verified the dilution ratio of the developed diluter by the flow rate, numerical solution, gas concentration and particle concentration. The ejector-supplied flow rates were 10-50 L/min and the porous tube-supplied flow rates were 30, 50 L/min in this study. All methods above showed similar dilution ratios to each other within 10 % error rate. The dilution ratio was confirmed by comparing mass concentrations before and after the dilution process.

Keywords: ejector, porous tube, diluter, dilution ratio, particle

* Corresponding author.

Tel : +82-42-868-7068, Fax : +82-42-868-7284

E-mail : bhan@kimm.re.kr

Introduction

산업시설의 발달, 외부 미세먼지의 유입 및 대기의 정체로 인해 한반도 미세먼지의 농도가 증가하는 등 미세먼지에 대한 문제가 심각해지고 있으며 (Lee et al., 2018; Baek et al., 2004) 사람들이 미세먼지 문제를 점차 심각하게 생각하고 있다. 우리나라는 편서풍의 영향으로 중국 및 한반도 서해안에 위치한 발전소 및 산업시설에서 배출되는 대기오염물질이 도시에 유입되어 강수량이 적은 겨울, 봄철에 미세먼지의 농도가 높아진다(Lee et al., 2011). 이 시기에 국가차원에서 미세먼지 농도가 높은 날 석탄 화력발전소의 발전량을 줄이는 노력을 하고 있다. 굴뚝에서 배출되는 미세먼지에 대한 정보를 실시간으로 확보할 경우 대기오염 사고를 사전에 예방할 수 있고, 미세먼지 배출량을 확인하여 방지시설에 대한 개선이 가능해지기 때문에 발전시설에서 대기로 배출되는 미세먼지를 실시간으로 관리할 필요가 있다.

국내 화력발전소에서는 대기오염물질에 대한 배출현황을 실시간으로 측정하는 시스템인 TMS (Telemonitoring Systems, 굴뚝원격감시체계)를 사용하여 오염물질 배출을 관리하고 있다. 하지만 TMS의 경우 먼지 배출관리 측면에서 TSP (Total Suspended Particles)에 대한 정보만 나올 뿐 사회적으로 높은 관심을 보이고 있는 미세먼지나 초미세먼지에 대한 정보는 알 수가 없는 상황이다. 미세먼지나 초미세먼지에 대한 농도를 알기 위해서는 EPA Method 201A (US EPA, 1996) 등과 같은 미세먼지 측정의 표준이 되는 중량법 측정으로 이루어지고 있다(Park et al., 2018; Kim et al., 2017; Song et al., 2018).

석탄 화력발전소 굴뚝과 같은 고농도, 고수분 및 고온의 환경에서 미세먼지의 농도를 계측기를 사용하여 측정하기 위해서는 계측기에 적합한 온도 및 농도 조건을 충족시켜야 하고, 환경의 변화에서 발생하는 응축성 입자(CPM)의 생성을 억제해야 정확한 미세먼지의 농도 측정이 가능하다(Burtscher et al., 2001; Burtscher, 2005). 기존에 고농도의 에어로졸을 측정하기 위한 희석장치에 대한 연구는 오랫동안 지속되어 왔다. Hildemann 등 (1989)은 희석 터널 시스템을 이용하여 펌프로 직접 입자를 샘플링

하여 먼지를 포집하는 방식을 개발하였다. 하지만 부피가 커서 설치에 많은 공간이 필요하고, 냉각된 공기를 희석공기로 사용하여 응축성 입자가 생성될 가능성이 있다. Lyyränen 등 (1999)은 두개의 이젝터 희석기를 사용하여 첫번째 희석기에는 고온의 희석공기를 공급하고, 두번째 희석기에는 상온의 희석공기를 주입하여 자동차 디젤엔진의 배출 입자를 측정하였다. 또한 Lyyränen 등 (2004)은 이젝터형 희석기, 다공튜브형 희석기, 스마트 샘플러 등을 조합하여 디젤엔진 배출입자에서 입자의 응축 현상을 분석하였다. 동일한 희석공기를 공급하였을 때, 희석비 및 입자 크기분포를 보였고, 그 결과 다공튜브 희석기가 단독으로 사용되었을 때 응축성분을 억제하는데 가장 유리한 결과를 나타내고 있지만, 이젝터형 희석기와 조합에서 큰 차이가 없음을 나타내었다. 하지만 이러한 희석장치들의 대부분 희석비에 대한 정의를 명확하게 내리지 않고, 고정 희석비를 사용하고 있다. 또한 유동장에서 샘플링이 이루어지기 위해서는 등속흡입 샘플링을 해야 입자의 농도에 대한 왜곡이 발생하지 않는데, 그러한 부분을 고려하지 않고 있다.

본 연구진은 고농도, 고수분, 고온의 유동 환경에서 입자의 농도를 측정하기 위한 희석장치를 개발하였고(Shin et al., 2019), 위 환경에서 측정한 입자의 농도를 정확히 예측하기 위해서는 개발한 희석기의 정확한 희석비가 정의 되어야 한다. 이에 본 연구에서는 개발한 희석기의 상온, 대기압 조건에서 정확한 희석비에 대한 정의를 하고자 희석기에 공급하는 유량에 따른 입구 샘플링 유량을 직접 측정하였다. 또한 유량을 통한 희석비, 수치해석을 통해 계산한 희석비, 질량유량의 비를 통한 희석비 및 가스 농도를 측정하여 구한 희석비를 비교하였다. 여기서 정의된 희석비를 바탕으로 입자에 대해 희석기의 작동이 유효한가를 판단하고자 하였다.

Experimental Setup

그림 1은 본 연구에서 개발한 희석장치의 개략도이다. 본 연구에서는 이젝터 희석기(ED)와 다공튜브 희석기(PRD)의 조합으로 이루어진 희석기를 개발하였다. ED에 깨끗한 공기를 공급하여 공급 유량에

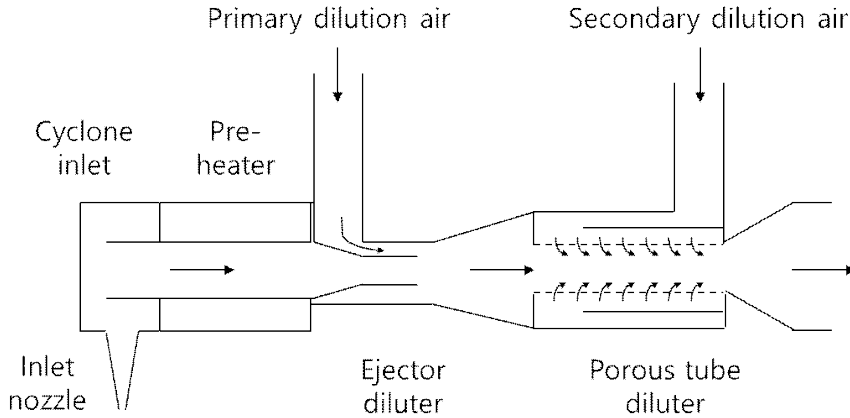


Fig. 1. Schematic of the diluter developed in this study.

따라 이젝터 노즐 끝 부분의 압력이 변화하고, 이때의 압력차로 인해 샘플링 되는 공기의 유량을 결정하게 된다. 또한 입구 노즐(Inlet nozzle)은 2-5 mm의 직경을 준비하여 등속흡입 조건에 맞게 사용할 수 있도록 하였다. 이를 통해 샘플링 하고자 하는 유동장의 유속과 이젝터로 공급되는 유량에 따른 입구 샘플링 유속을 맞춤으로써 등속흡입 샘플링이 가능하게 한다. 이때 ED로 공급되는 공기는 고온의 공기로, 샘플링된 고온의 공기의 온도가 급격하게 떨어져 응축성 입자가 발생하는 것을 막는 역할을 하게 된다. PRD로 상온의 희석공기가 공급이 되고,

공급되는 유량에 따라 희석비를 결정한다. 나아가, 샘플링된 공기의 온도를 떨어뜨려 측정기에서 측정 가능한 온도로 낮추어 정확한 입자 농도 측정이 이루어지게 하는 역할을 한다. 또한 다공튜브로 상온의 희석공기를 공급함으로써, 이젝터 후단에서 발생하는 난류에 의한 입자손실을 줄여주는 역할을 한다. 희석기의 입구는 싸이클론으로 이루어져 있고, 이때 cut-off-size는 10 μm 이다. 산업현장에서 측정을 하면 10 μm 보다 큰 입자가 샘플링 될 수도 있고, 이때 싸이클론 입구를 통해 큰 입자를 제거하여 희석기 내부 막힘 또는 측정기의 손상을 방지하는 역할

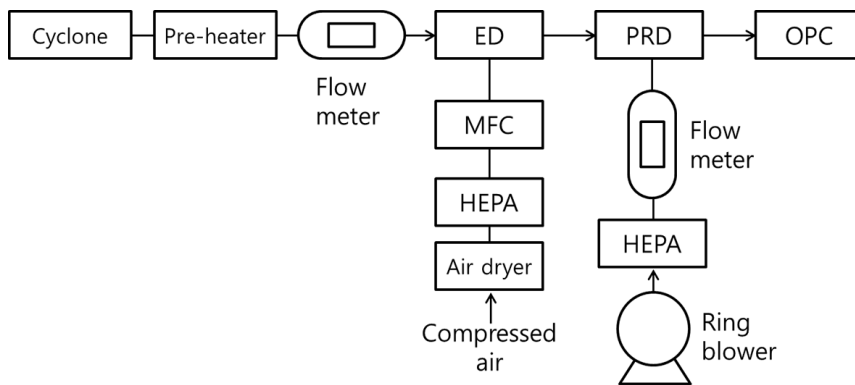


Fig. 2. Experimental schematic diagram of the newly developed for measuring the suction flow rate by supplying the clean air to ED. Here, ED is the ejector diluter and PRD is the porous-tube diluter.

을 한다. Pre-heater는 고온의 유동장에서 샘플링된 공기가 온도변화에 의해 발생하는 응축성분의 생성을 억제하기 위해 샘플링 된 후에도 희석 전까지 고온으로 유지시켜주는 역할을 한다.

그림 2는 희석장치의 부피 유량을 측정하기 위해 구성한 실험 개략도이다. ED와 pre-heater히터 사이에 유량계(4143, TSI, USA)을 설치하여 0-20 L/min 사이의 유량값을 측정하도록 하였고, PRD에는 Ring blower (KJB1-400, KIJEONSA, Korea)와 HEPA (High Efficiency Particulate Air)필터를 이용하여 10-100 L/min의 깨끗한 공기를 공급이 가능하도록 하였고, 유량계(4043, TSI, USA)및 비례 제어 밸브를 통해 조절하였다. ED에는 압축공기를 Air dryer (SHD-10, SEHAN Dryer Co. Ltd., Korea)를 이용하여 압축공기의 수분 성분을 제거하고, HEPA 필터를 이용하여 ED에 완전히 깨끗한 공기를 공급하게 하였다. 이때, 유량은 Mass Flow Controller (MFC)를 사용하여 조절이 가능하도록 하였다. 본 실험 구성을 통해 ED와 PRD에 공급하는 유량에 따라 흡입 유량을 측정하여 희석비(DR)를 식 (1)과 같이 계산하였다.

$$DR_Q = \frac{Q_{sample} + Q_{ED} + Q_{PRD}}{Q_{sample}} \quad \text{식 (1)}$$

여기서,

DR_Q : 유량을 통해 구한 희석비

Q_{sample} : 샘플링 입구 유량 (L/min)

Q_{ED} : 이젝터 공급 유량 (L/min)

Q_{PRD} : 다공튜브 공급 유량 (L/min)

이를 검증하기 위하여 가스를 이용하여 희석비를 구하였고, 입자에 적용하였을 때, 입자 크기 별로 희석비가 적용 되는가를 판단하기 위해 그림 3과 같이 실험을 구성하였다. 아크릴 덕트의 상류측에 가스 및 입자를 공급하도록 하였고, 다공관을 통해 유동이 정상상태를 이루도록 하였다. 덕트 하류측에 Ring blower를 두어 음압으로 유동이 발생하도록 하였다.

가스는 sulfur dioxide (SO₂) 1% 용기를 사용하였고, SO₂용 MFC를 사용하여 초기 가스 농도가 1000 ppm으로 일정하도록 유지하였고, 가스 측정은 가스 분석기(VARIO plus, MRU instruments, Inc., USA)를 사용하였다. 덕트 하류측에 있는 Ring blower의 유량은 45 L/min으로 하였고, 가스용 MFC의 유량은 5 L/min으로 하였다. ED에 10-50 L/min의 유량을 공급하고, PRD는 희석공기를 공급하지 않았다. 가스의 희석비는 다음의 식 (2)와 같이 구하였다.

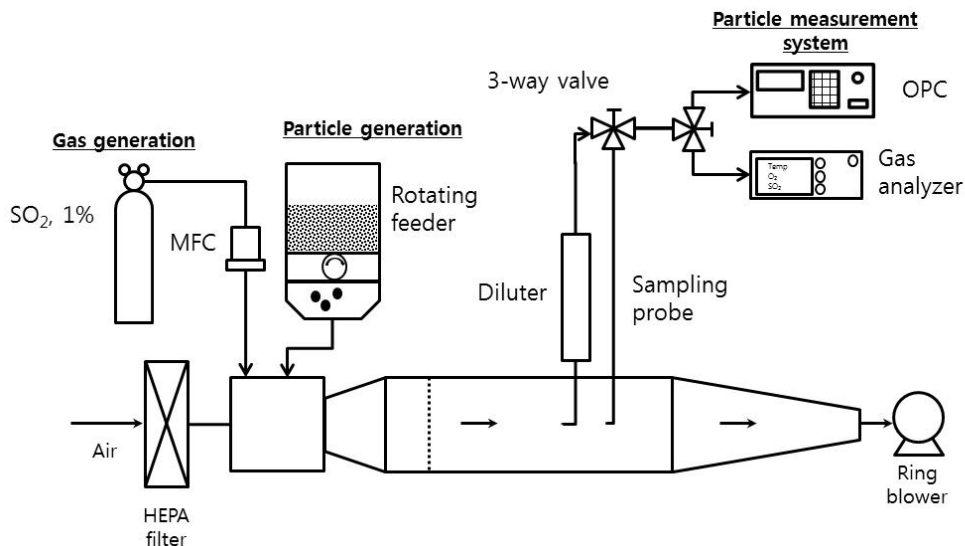


Fig. 3. Experimental schematic diagram of the measurement of gas concentration and particle concentration before and after dilution.

$$DR_{gas} = \frac{C_{before\ dilution}}{C_{after\ dilution}} \quad \text{식 (2)}$$

여기서, DR_{gas} 는 가스 희석비를 의미하고, $C_{before\ dilution}$, $C_{after\ dilution}$ 는 가스 계측기에서 측정한 희석 전, 후의 가스 농도를 의미한다. 가스가 희석과정에서 부피비로 희석되는 것이 아니라, 몰비로 희석되기 때문에 이와 같은 경우 질량유량을 이용하여 가스 농도와 비교하여야 정확한 가스 희석비를 비교할 수 있다(Giechaskiel et al., 2004). 질량 유량을 이용하여 희석비를 검증하기 위하여 식(3)을 사용하였다.

$$DR = \frac{\dot{n}_{sample} + \dot{n}_{ED} + \dot{n}_{PRD}}{\dot{n}_{sample}} = 1 + \frac{\dot{m}_{ED}/M_{ED} + \dot{m}_{PRD}/M_{PRD}}{\dot{m}_{sample}/M_{sample}} \quad \text{식 (3)}$$

여기서 \dot{n} , \dot{m} 은 몰 및 질량유량을 의미하고, M 은 해당 가스의 분자량을 의미한다. M_{sample} 은 1000 ppm, 상온, 대기압 상태의 sulfur dioxide (SO₂)의 분자량이고 28.88 g/mol 이다. 또한 M_{ED} , M_{PRD} 는 공기의 분자량으로 28.84 g/mol이다.

입자는 Fly ash를 사용하여 수백 나노에서 수십 마이크로미터의 크기까지 발생할 수 있도록 하였고, rotating feeder를 사용하여 실험이 진행되는 동안 일정한 농도를 유지할 수 있도록 하였다. 입자 계측은

optical particle counter (OPC, 1.109, Grimm, Germany)를 사용하였다. 실험은 희석기와 샘플링 관에서 입자를 샘플링하는데 있어 입자손실을 동일하게 하기 위해, 3/8 inch stainless steel 관을 희석기와 동일한 길이로 제작하여 희석 전 농도를 측정하였고, 희석기 후단에 입자 계측기를 두어 희석 후 농도를 측정하도록 하였다. 입자 실험은 ED에 20 L/min을 공급하고, PRD에 50 L/min을 공급하였고, 이때의 희석비를 적용하여 크기에 따른 희석 전 농도, 희석 후 농도 및 희석 후 농도에 희석비를 보정한 농도를 통해 입자를 통한 희석비 검증을 하고자 하였다. 4 mm의 샘플링 입구 노즐을 사용하여 ED 공급유량이 20 L/min일 때 샘플링 입구 유속이 약 2 m/s이고, 240 X 240 mm 아크릴 덕트에서 덕트 중앙부 유속을 2 m/s로 만들기 위해 ring blower의 유량을 5 m³/min으로 하여 등속흡입 조건을 만족시켰다.

수치해석을 통해 ED 공급 유량에 따른 샘플링 입구 유량을 계산하여 유량 측정을 통해 얻은 희석비와 비교하고자 하였다. 희석기 내부의 유동은 정상상태 비압축성으로 가정하였다. 유동해석에 사용한 방정식은 Navier-Stokes 방정식을 사용하여 계산하였고, 난류모델은 k- ω SST (Shear stress transport)를 사용하였다. k- ω SST는 벽면에서의 흐름을 예측하는데 적합한 k- ω 모델과 벽에서 멀리 떨어진 영역의 이상적인 예측이 가능한 k- ϵ 모델이 결합한 난류모델로써(Ansys Inc, 2009), 이젝터 끝 단의 좁은 틈과 상대적으로 큰 직경의 PRD 부분의 정확한 예

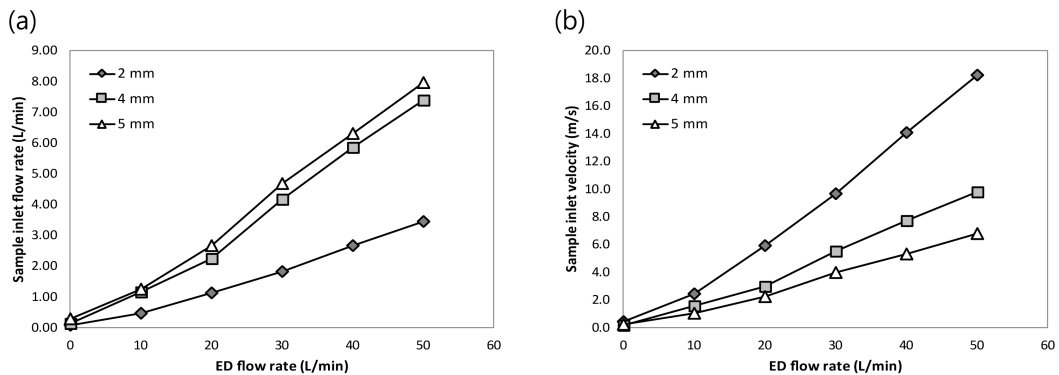


Fig. 4. Sample inlet flow rate (a) and velocity (b) according to the flow rate supplied to the ejector with sample-inlet-nozzle diameters.

측을 위해 적용하였다. $k-\omega$ SST 모델을 사용하기 위하여 격자의 y^+ 를 10 이하가 되도록 하였다 (Menter et al., 2003). 유동해석의 경계조건은 ED에 공급되는 유량을 10~50 L/min으로 설정하였으며, 샘플링 입구와 희석기 출구의 게이지압력을 0 Pa로 설정함으로써 ED에 공급하는 유량에 따른 압력차이로 샘플링되는 유량을 얻고자 하였다. 벽면의 경우 마찰이 발생하는 no-slip 조건으로 설정하였다.

Experimental result

그림 4(a)는 샘플링 입구 노즐 직경에 따른 ED에 공급유량이 0-50 L/min으로 증가할 때 샘플링 입구 유량에 대한 결과를 나타내고 있다. 입구 노즐의 직경이 작을수록 샘플링 입구 유량이 작은 것을 확인할 수 있고, ED 공급유량이 증가할수록 선형적으로 샘플링 입구 유량이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 하지만 그림 4(b)와 같이 ED공급 유량에 따른 샘플링 입구 유속으로 나타내면, 2 mm 노즐 사용시 0 m/s 에서 18 m/s까지 넓은 범위의 유속을 나타낼 수 있음을 확인할 수 있다. 또한, 동일 유량에서 입구 노즐의 직경이 작을수록 유속이 더 빠름을 확인할 수 있는데, 이는 유속은 직경의 제곱에 반비례하기 때문이다. 위 결과를 바탕으로 입구 노즐의 직경이 작을수록 일정 ED 공급유량 범위에서 넓은 영

역의 등속흡입 조건을 만족시킬 수 있음을 알 수 있다.

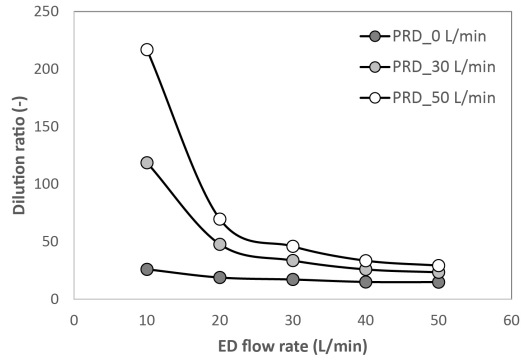


Fig. 5. Dilution ratios using different flow rates supplied to the ejector (ED) and porous tube (PRD)

그림 5는 ED에 10-50 L/min의 유량을 공급하면서, PRD에 0, 30, 50 L/min의 유량을 공급할 때의 희석비를 나타내는 그래프이다. ED의 공급 유량이 증가할수록 희석비가 작아지는 것을 확인할 수 있는데, 이는 ED 공급유량이 많아짐에 따라 입구 샘플링 유량이 증가하기 때문이다. ED에 10 L/min을 공급할 때, 희석비가 상당히 높은 것을 확인할 수 있는데, ED 공급유량이 너무 작아 충분히 입구에서 샘플링이 이루어 지지 않기 때문이다. 한편, ED 공급유량이 20 L/min 이상부터는 희석비 변화가 뚜렷하게 보

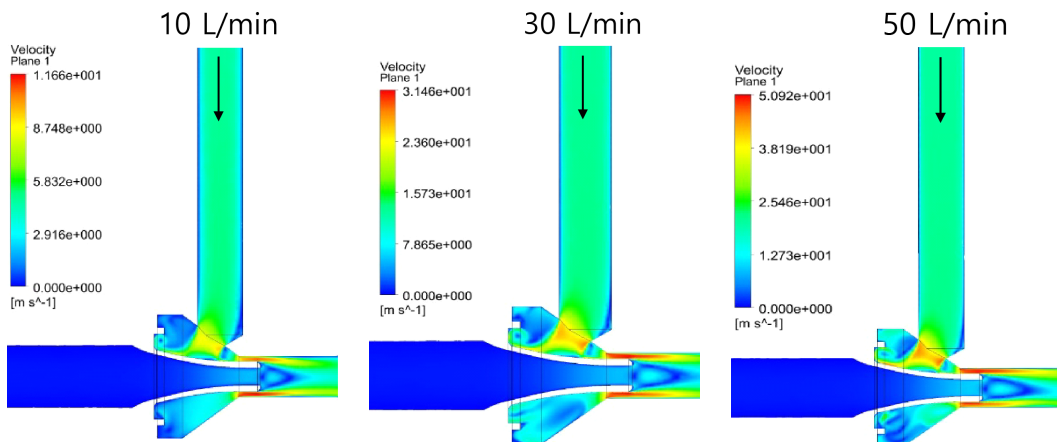


Fig. 6. Velocity contours according to the supplied flow rate to the developed ejector diluter.

이지 않는데 이는 그림 4(a)에서 알 수 있듯이 공급 유량이 충분할 경우 공급유량 증가에 따라 흡입 유량이 거의 선형적으로 증가하기 때문이다. 따라서 본 연구에서 개발한 희석장치의 경우 20 L/min 보다 높은 유량을 공급해야 한다. 20 L/min 보다 작을 경우 ED 공급유량의 작은 오차에도 희석비가 크게 변하기 때문이다. 해당 ED를 공급유량 범위에서 최소 14배에서 많게는 80배까지 희석이 가능하다. 물론 PRD 공급 유량을 증가시킴에 따라 희석비를 더 높게 할 수 있다.

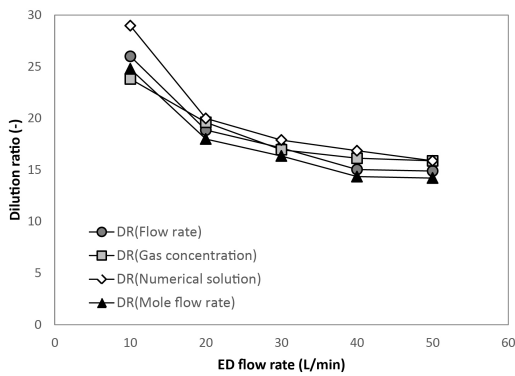


Fig. 7. Dilution ratios using different methods to verify the dilution ratio according to flow rates supplied to the ejector (ED).

그림 6은 본 연구에서 설계한 희석기의 ED공급 유량에 따른 흡입유량을 유동해석을 통해 계산한 유속 contour이다. 각각 ED에 10, 30, 50 L/min으로 유량을 공급하였을 때, 이젝터 내부의 유속을 나타내고 있고, 이때 샘플링 입구 흡입 유속을 유량으로 환산하면, 0.35, 1.8, 3.4 L/min이다.

그림 7은 그림 6에서 구한 유량에 대한 희석비를 검증하기 위해 가스농도를 이용하여 희석비와 수치해석을 통해 구한 희석비 및 몰비를 이용한 희석비를 비교한 결과이다. 수치해석 결과 ED 공급유량이 10 L/min인 경우를 제외하고 유량 희석비에 비해 약 6% 높게 희석비가 나타나는 것을 확인 하였고, 가스 희석비 또한 유량 희석비로 측정된 결과와 약 5% 차이로 상당히 유사한 희석비를 나타내고 있음을 확인하였다. 수치해석, 가스농도 및 질량유량을 이용한 희석비가 오차율 10% 안에 있고, 이는 유량

을 통해 측정된 희석비가 신뢰할 만 하다고 보여진다.

그림 7에서 검증한 희석비를 적용하여, Fly ash 분진을 이용하여 입자 희석비 검증 실험을 수행하였고, 그 결과 그림 8과 같다. 입자 크기 별 질량농도 그래프로 나타내었고, 이때의 10 μm 입자보다 작은 입자에서 가장 높은 농도를 나타내는 직경은 3 μm이다. 희석 전 입자의 질량농도 그래프를 살펴보면, 10 μm 이상의 입자에서 농도가 높게 분포하는 것을 확인할 수 있는데, 희석 후 질량농도 분포에서는 확인할 수 없다. 이는 희석기 입구에 위치한 싸이클론에서 제거되었다고 판단 할 수 있다. 또한 희석 후 농도에 희석비를 보정하여 나타낸 질량농도 그래프를 살펴보면 희석 전 농도와 거의 유사한 것을 확인할 수 있다. 위 그래프를 통해 본 연구에서 개발한 희석기를 사용할 경우 희석 후 발생하는 입자 손실이 거의 적음을 알 수 있고, 또한 그림 6에서 정의한 희석비의 타당성을 입자를 통해서 검증할 수 있었다.

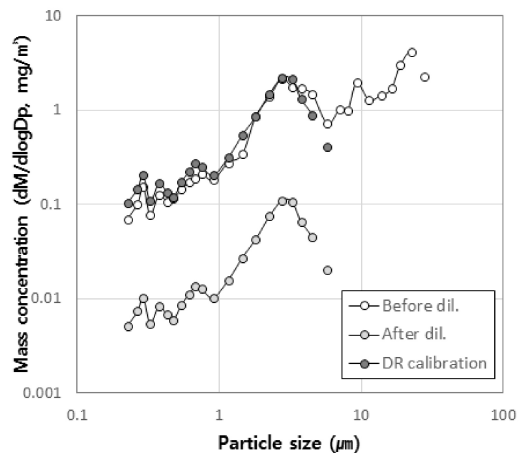


Fig. 8. Size distribution of the mass concentration before and after dilution.

Conclusion

본 연구에서는 고온, 고수분 및 고농도 환경에서의 입자 농도를 측정하기 위한 희석기를 개발하였고, 희석기의 정량 희석비를 검증하기 위한 실험을 수행하였다. ED에 공급하는 유량을 10-50 L/min가

지 변화하면서 2, 4, 5 mm의 샘플링 입구 노즐의 직경에 따른 샘플링 입구 유량을 측정하였고, 이때의 유속을 비교하였다. 2 mm 노즐을 사용하였을 때, 넓은 범위의 유속조건에서 등속흡입 조건을 만족시킬 수 있는 것을 확인하였다. ED, PRD 공급 유량에 따라 샘플링 입구 유량을 측정하였고, 이를 통해 희석비를 산출하였다. ED 공급 유량이 증가할수록 희석비가 줄어드는 것을 확인 하였고, ED 공급 유량이 약 20 L/min 미만에서 흡입 유량이 작아 ED 공급유량의 작은 변화에도 큰 희석비 차이를 보였다. 이를 통해 본 연구에서 개발한 희석기의 ED 공급 유량은 20 L/min이 적합하다고 판단된다. 앞에서 구한 정량 희석비를 검증하기 위해 수치해석을 통한 샘플링 입구 유량을 계산하였고, 희석 전, 후의 가스 농도비를 통해 유량 희석비와 비교하였고, 나아가 상온, 대기압 조건에서 측정을 통해 얻은 유량을 가지고 몰유량을 계산하여 몰에 대한 희석비를 구하여 가스 희석비와 비교하였다. 그 결과 4가지 희석비 모두 ED 공급 유량에 따라 오차율 10% 이내로 유사한 희석비를 얻을 수 있었다. 검증 과정을 거쳐 얻은 정량 희석비를 가지고 입자에 적용하였고, 그 결과 입자 크기에 관계없이 희석 전과 희석 후 농도의 보정 농도가 유사함을 확인하였다.

비록 실제 측정환경과 다르지만 실험실 수준에서 수치해석, 부피유량, 질량유량, 가스 및 입자를 통한 희석장치의 희석비 검증을 위한 실험을 수행하였고, 위 실험 결과를 통해 개발 희석기가 정량 희석 및 등속 흡입이 가능한 것을 확인 할 수 있었다.

감사의 글

이 연구는 산업부의 청정화력핵심기술개발사업의 지원을 받아 수행되었고 이에 감사드립니다.

Reference

- Back, K.W., and Chung, J.D. (2004). Study on the Yellow Sandy Dust Phenomena in Korean Peninsula and chemical compositions in fine particles at background sites of Korea, *Journal of Environmental and Sanitary Engineering*, 19, 9-18.
- Burtscher, H., Baltensperger, U., Bukowiecki, N., Cohn, P., Hüglin, C., Mohr, M., Matter, U., Nyeki, S., Schmatloch, V., Streit, N., and Weingartner, E. (2001). Separation of volatile and non-volatile aerosol fractions by thermodesorption: instrumental development and applications, *Journal of Aerosol Science*, 32, 427-442.
- Burtscher, H. (2005). Physical characterization of particulate emissions from diesel engines: a review, *Journal of Aerosol Science*, 36, 896-932.
- Giechaskiel, B., Ntziachristos, L., and Samaras, Z. (2004). Calibration and modelling of ejector dilutors for automotive exhaust sampling, *Measurement Science and Technology*, 15, 2199-2206.
- Hildemann, L.M., Cass, G.R., and Markowski, G.R.(1989). A Dilution Stack Sampler for Collection of Organic Aerosol Emissions: Design, Characterization and Field Tests, *Aerosol Science and Technology*, 10, 193-204.
- Kim, H.B., Kim, D.S., Youn, J.S., Han, S., Heon, Y.W., and Jeon, K.J. (2017). Comparison of measurement methods and size fraction of fine particles (PM10, PM2.5) from stationary emission source using Korean standard and ISO: coal power plant and refinery, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 33, 342-350.
- Lee, H.J., Jeong, Y., Kim, S.T., and Lee, W.S. (2018). Atmospheric circulation patterns associated with particulate matter over South Korea and their future projection, *Journal of Climate Change Research*, 9, 423-433.
- Lee, S.M., Ho, C.H., and Choi, Y.S. (2011). High PM10 concentration episodes in Seoul, Korea: Background sources and related meteorological conditions, *Atmospheric Environment*, 45, 7240-7247.
- Lyyräinen, J., Jokiniemi, J., Kauppinen, E.I., and Joutsensaari, J. (1999). Aerosol characterization in medium-speed diesel engines operating with heavy fuel oils, *Journal of Aerosol Science*, 30, 771-784.

- Lyyränen, J., Jokiniemi, J., Kauppinen, E. I., Backman, U., and Vesala, H. (2004). Comparison of Different Dilution Methods for Measuring Diesel Particle Emissions, *Aerosol Science and Technology*, 38, 12-23.
- Menter, H.R., Kuntz, M., and Langtry, R. (2003). Ten Years of Industrial Experience with the SST Turbulence Model, *Turbulence, Heat and Mass Transfer*, 4, 625-632.
- Park, H.S., Lee, D.A., Yang, J.G., and Jang, S.G. (2018). Emission Characteristics of PM10 and PM2.5 in Thermal Power Plants Using Different Fuel Types, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 34(4), 534-541.
- Song, G.J., Moon, Y.H., Joo, J.H., Lee, A.Y., and Lee, J.B. (2018). TSP, PM10 and PM2.5 Emission Characteristics in a Coal-fired Power Plant, *Korea Society for Environmental Analysis*, 21(1), 52-60.
- Shin, D., Woo, C.G., Hong, K.J., Kim, H.J., Kim, Y.J., Lee, G.Y., Chun, S.N., Hwang, J., Han, B. (2019). Development of a new dilution system for continuous measurement of particle concentration in the exhaust from a coal-fired power plant, *Fuel*, 257, 116045.