

고온로를 이용한 매연발생장치

조상환* · 박선호* · 남연우** · 최유열** · 이원남*†

Soot Generation System Utilizing High-Temperature Furnace

Sanghwan Cho*, Sunho Park*, Younwoo Nam**, Yoo youl Choi**, Wonnam Lee*†

ABSTRACT

A new soot particle generation system has been developed and tested. The soot generation system consists of two sections, a fuel supply and a soot production. In the fuel supply module, either liquid fuel precisely controlled by a syringe pump is mixed with preheated carrier gas and rapidly evaporated or gaseous fuel controlled by a MFC is diluted with dilution gas. The soot production module contains a heater that can raise the gas/fuel temperature up to 1400°C. The physical and chemical properties of produced soot particles depend on the type and concentration of fuel, the residence time, and temperature in the soot production section. The soot generation system will be utilized to produce well-defined soot particles for soot studies such as the evaluation of experimental sampling and analysis processes for the quantitative assessment of PM and BC from ships and the adverse health effects on pulmonary and cardiovascular systems of human body.

Key Words : Soot, Pyrolysis, PM, Soot generation system, TEM

육상용 디젤엔진에서 배출되는 매연입자/PM에 대한 규제가 시행되면서 이를 저감하기 위한 많은 연구가 수행되어 왔다. 특히 최근에는 배출되는 입자 크기 별로 규제하려는 추세를 보이고 있다. 따라서 엔진에서 배출되는 매연입자를 제어하고 후 처리하는 방법에 대한 연구는 배출되는 매연입자의 크기, 구조적 화학적 특성 등을 고려하여 수행되는 것이 바람직하다. 이와 더불어 현재 북극권 해빙과 관련하여 선박에서 배출되는 PM을 규제하려는 논의가 이루어지고 있으며, 이에 대한 대책으로 매연배출에 대한 체계적인 연구가 요구된다. 따라서 다양한 엔진에서 배출되는 매연을 측정하고 결과를 해석하기 위해서는 그 특성이 잘 정의된 매연입자를 생성하는 장치가 필요하다.

대기에 배출되는 매연입자/PM은 기본적으로 나노 입자로서 인체의 건강에 악영향을 미치는 것으로 알려져 있으며, 특히 호흡기 질환과 순환계 질환 등에 대한 연구가 활발히 수행되고 있다.⁽¹⁻³⁾ 그러나 PM의 물리적 화학적 특성이 인체에 미치는 영향에 대한 체계적인 연구는 많이 수

행되지 못하고 있다. 이는 물리적, 화학적으로 잘 정의된 매연입자/PM의 제공이 쉽지 않기 때문이다. 그러므로 특성이 잘 정의된 매연입자를 발생할 수 있는 장치의 개발은 엔진과 관련된 연구뿐만 아니라 의학적인 연구에도 도움을 줄 수 있다.

매연입자의 생성 장치로 동축류 역확산화염을 이용한 방법⁽⁴⁾과 연료의 열분해(pyrolysis)를 이용하는 방법⁽⁵⁾이 개발되었다. 그러나 현재 널리 사용되는 동축류 역확산화염을 이용하는 방법은 매연입자의 특성을 결정하는 다양한 인자들을 직접적이고 독립적으로 제어하는데 제한이 있을 수 있다. 반면에 디젤 배기가스 내 매연 및 유기성 용해물질(VOC)을 모사하기 위하여 개발된 연료의 열분해를 이용하는 장치는 디젤연료의 분무와 증발을 이용하는 방법으로 사용 범위가 매우 제한된다고 할 수 있다. 본 연구는 이와 같은 제약을 개선하기 위하여 수행되었으며, 다양한 기체와 액체연료를 사용할 수 있는 새로운 구조의 매연발생장치를 개발하였다. 개발된 매연발생장치는 기본적으로 기체상의 연료와 불활성기체 혼합기를 고온의 열분해 장치에 일정한 유량으로 공급하면서 유량, 온도, 연료 종류 및 농도를 제어하여 원하는 특성을 갖는 매연입자를 생성하게 된다. 이때 액체연료일 경우 액상에서 연료의 유량을 제어하고 공급되는 연료를 순간적으로 증발

* 단국대학교 기계공학과

** 한국전급

† 연락처: wlee@dku.edu

Tel : (031)8005-3503 Fax : (031)8021-7215

시켜 예열된 불활성기체와 혼합하여 열분해 장치로 공급하는 구조를 갖는다.

매연발생장치

탄화수소연료의 연소과정에서 발생하는 매연입자를 화염 없이 열분해를 통해 모사가 가능하도록 매연발생장치를 제작하였다. 이 장치에는 기체와 액체 상태의 탄화수소 연료 모두 사용가능하며, 온도, 연료 농도, 체류시간 등을 조절하여 조건별로 발생하는 매연 입자의 특성을 조절할 수 있도록 하였다.

매연발생장치는 매연발생기(soot generator)와 연료/불활성기체 혼합 및 공급장치(fuel supply section)로 구성되어 있다. Fig. 1은 고온로를 이용한 매연발생기와 온도제어장치 및 증발/혼합기와 액체연료 공급장치를 모두 보여준다. Fig. 2는 탄화수소 연료와 불활성 기체를 혼합하여 고온의 매연발생기로 공급하는 장치의 개략도를 보여준다. 연료가 기체일 경우 MFC2를 통하여 공급하고 MFC1로 제어된 불활성기체와 혼합하게 된다. 연료가 액체일 경우에는 시린지 펌프를 사용하여 미량의 액상 연료유량을 공급하고 예열된 연료는 증발모듈에서 불활성기체와 혼합되면서 순간적으로 증발되도록 구성하였다. 따라서 매연발생기 입구로 공급되는 혼합기는 항상 기체상을 유지하게 된다.



Fig. 1 Soot generation system

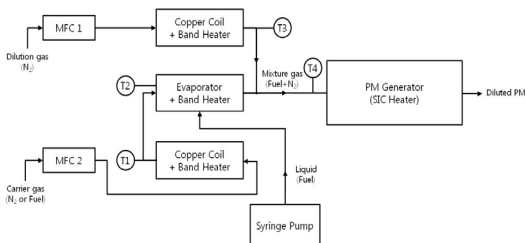


Fig. 2 Fuel supply section.

매연발생기에서 매연입자는 고온의 세라믹(alumina) 튜브를 통과하며 연료의 열분해 과정으로 생성된다. 따라서 세라믹 튜브 내의 온도와 체류시간은 생성되는 매연입자의 특성을 결정하는 중요한 인자가 된다. 세라믹 튜브 내의 온도를 측정하고 이를 이용하여 열분해 과정이 발생하는 지역에서의 체류시간과 온도를 알아보았다. 세라믹 튜브가 장착되어 있는 고온로는 최대 1400°C까지 사용이 가능하도록 설계되어 있다. 그러나 고온의 조건에서 온도 측정에 제약이 있어 200°C, 500°C, 및 800°C 조건에서 온도를 측정하고 이를 바탕으로 시뮬레이션을 통하여 고온 조건에서의 체류시간과 온도를 결정하고자 하였다. Fig 3은 800°C 조건에서 측정된 유량별 온도와 체류시간을 보여주고 있다. 유량이 1.0, 2.0 slpm(standard liter per minute)에서는 최고온도가 거의 유사하고, 4.0, 6.0 slpm에서는 각각 약 30°C와 80°C 낮아지는 것을 알 수 있었다. 또한 고온에 노출되는 체류시간은 대략적으로 유량에 반비례하는 것을 알 수 있다.

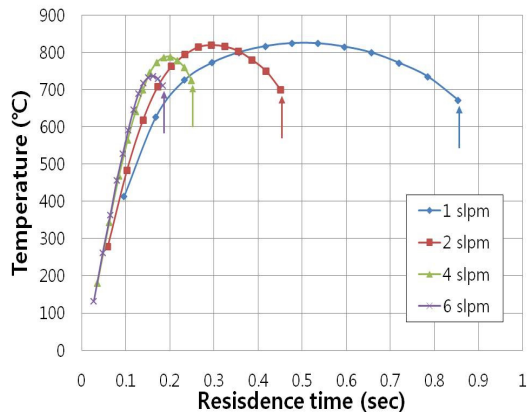
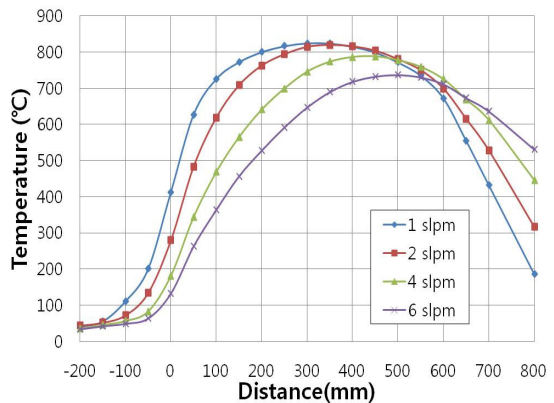


Fig. 3 Temperature profile and residence time.

매연생성특성

매연발생장치에서 생성된 매연입자는 Fig. 4와 같이 세라믹 튜브 출구로 방출된다. 생성되는 매연입자의 특성을 알아보기 위하여 출구에서 매연입자를 일정한 시간(5초) 동안 포집하여 가시적인 변화를 알아보았다. 연료로는 기체상인 프로필렌(C_3H_6)과 액상인 n-헥산(C_6H_{14})을 사용하였다. 질소로 희석된 다양한 연료 농도에서 고온로의 온도를 1200, 1300, 1400°C로 설정하고 유량을 1.0, 2.0, 4.0, 6.0 slpm으로 변화시키면서 실험하였다.

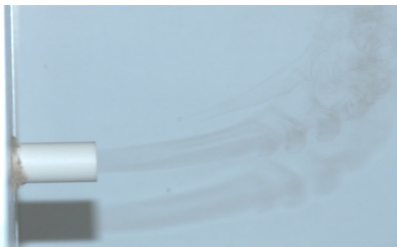


Fig. 4 Emission of soot particles.

Figure 5는 프로필렌 연료를 사용한 다양한 조건에서 생성되는 매연입자의 가시적 변화를 보여준다. 온도의 증가에 따라 포집된 매연의 색이 갈색에서 검은색으로 변화하였다. 또한 온도가 낮거나 체류시간이 짧은 조건(높은 유량)에서는 매연의 색이 갈색으로 변하고 농도도 떨어지는 것을 알 수 있다. 연료의 몰분율의 증가는 생성되는 매연의 양을 증가시키게 된다. Fig. 5는 동일한 온도와 체류시간 조건에서 연료의 농도를 변화시킨 결과도 보여주고 있다. 체류시간이 비교적 긴 2.0 slpm의 조건에서는 1300°C 이상의 온도에서는 검은색의 매연입자가 생성된 것을 알 수 있으며 연료농도 증가는 생성되는 매연의 양을 증가시키는 것으로 관찰되었다.

액상연료인 n-헥산을 이용하여 매연을 생성하여 매연발생장치가 다양한 액상 연료를 사용할 수 있다는 것을 확인하였다. Fig. 6은 n-헥산의 실험에서 생성되는 매연입자의 가시적 변화를 보여준다. 프로필렌의 경우와 유사하게 동일한 체류시간에서 매연입자의 생성이 연료의 농도와 온도에 따라 증가하는 경향을 보이는 것을 알 수 있다. 일반적으로 동일한 연료 유량에서 프로필렌의 경우보다 더 많은 매연이 생성되는 것을 알 수 있으며 이는 n-헥산의 경우 동일한 연료 몰분율에서 탄소의 양이 2배로 공급되기 때문이라고 이해된다.

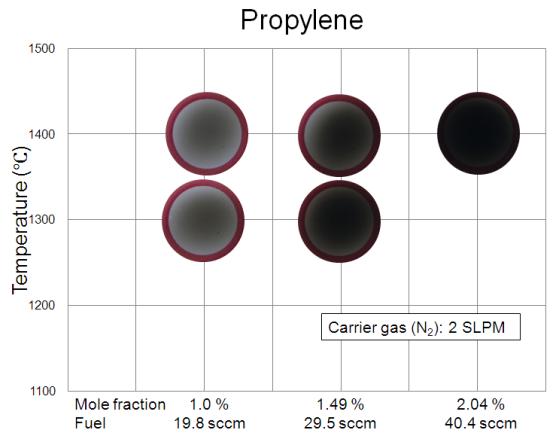
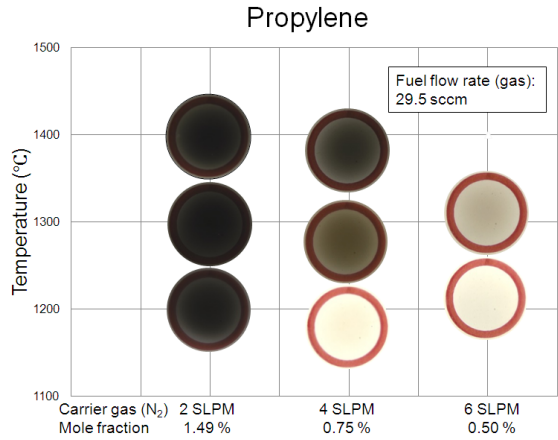


Fig. 5 Soot production with propylene.

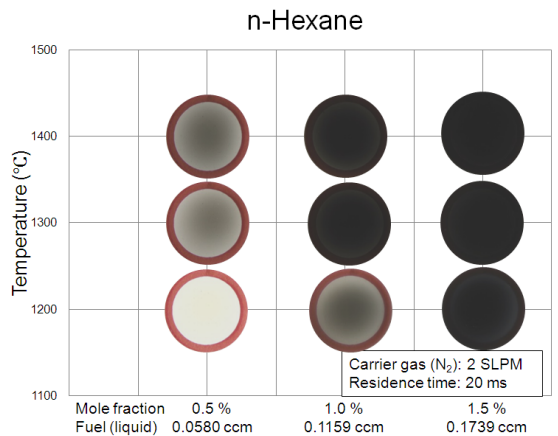


Fig. 6 Soot production with n-hexane.

다양한 조건에서 생성되는 매연의 특성을 알아보기 위하여 TEM 분석을 수행하였다. Fig. 7은 프로필렌 연료를 사용한 다양한 조건에서의 TEM 사진을 보여준다. Case 1은 1200°C, X_f (연료물분율) 1.49%, 유량 2.0 slpm 조건, case 7은 1400°C, $X_f = 1.49\%$, 유량 2.0 slpm 조건, 그리고 case 8은 1400°C, $X_f = 0.75\%$, 유량 4.0 slpm 조건에서 형성된 매연입자를 보여준다. 체류시간이 짧은 case 8의 경우 primary 입자의 크기가 작으며, 온도가 낮은 case 1의 경우에는 생성된 매연의 입자가 완전히 탄화되지 않고 많은 VOC 성분이 존재하는 전형적인 모습을 보여준다. 온도가 높고(1400°C) 체류시간이 긴 경우 완전한 구형의 primary 입자가 비교적 크게 형성되어 있는 것을 볼 수 있다.

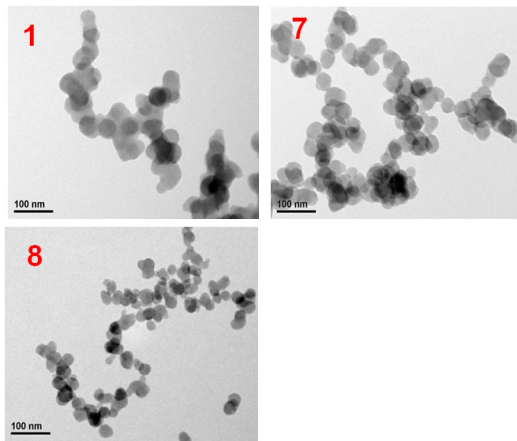


Fig. 7 TEM photos of propylene soot particles.

Figure 8은 액상 연료인 n-헥산의 TEM 분석 결과를 보여준다. Case 14는 1300°C, $X_f = 1.50\%$, 유량 1.0 slpm 조건, case 15는 1300°C, $X_f = 1.50\%$, 유량 2.0 slpm 조건에서 형성된 매연입자를 보여준다. 체류시간이 동일하고 연료물분율이 동일한 조건에서 n-헥산으로 생성된 매연의 모습(case15)은 프로필렌의 결과(case 7)와 큰 차이가 없는 것을 볼 수 있다. 그러나 동일한 조건(온도 및 연료물분율)에서 체류시간이 길어지면(case 14) primary 입자의 크기가 커지는 것을 볼 수 있다. 따라서 체류시간의 조절로 매연의 primary 입자 크기 제어 가능성을 확인할 수 있었다. 추가적 실험을 통하여 primary 입자 크기에 대한 연료 종류, 연료 농도 및 온도의 영향을 좀 더 체계적으로 알아볼 예정이다.

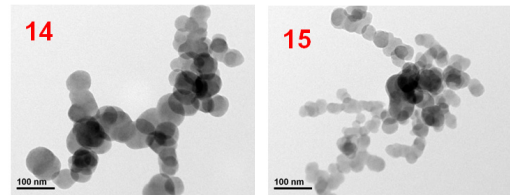


Fig. 8 TEM photos of n-hexane soot particles.

후 기

본 연구는 국토해양부의 해양안전 및 해양교통 시설기술개발사업의 “선박배출 대기오염원(PM, BC) 기후변화 영향평가 및 저감기술 개발”지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고 문헌

- [1] I. M. Kennedy, “The Health Effect of Combustion-Generated Aerosols”, Proceedings of the Combustion Institute. 31, 2007, pp. 2757-2770.
- [2] B. Giechaskiel, B. Alföldy, Y. Drossinos, “A Metric for Health Effects Studies of Diesel Exhaust Particles”, Aerosol Science, 40, 2009, pp. 639-651.
- [3] N. A. H. Janssen, et al., “Black Carbon as an Additional Indicator of the Adverse Health Effects of Airborne Particles Compared with PM10 and PM2.5”, Environmental Health Perspectives, 119, 12, December 2011.
- [4] L. Jing, “CAST Soot Generator for Liquid Fuel,” 7th ETH Conference on Nanoparticle Measurement, 18. - 20. August 2003.
- [5] 남연우, 오광철, 이천환, 이춘범, “매연입자 발생장치를 이용한 디젤 배기가스 내 매연 및 유기성 용해물질(SOF) 모사”, 한국자동차공학회 학술대회 논문집, 2008. pp. 568-784.