

나노결정입자의 연기 제거 효과 가능성 평가 및 신규 물질 검토에 관한 연구

한동훈 · 천성수

중앙소방학교 소방과학연구실

Study on the Effectiveness of Nanostructured Particles and Other Potential Materials in Clearing Smoke

Han, Dong-Hun · Chun, Sung Soo

Fire Research Laboratory, National Fire Service Academy

요 약

나노결정입자와 일반 입자를 이용하여 60cm × 60cm × 180cm의 밀폐 공간에서 연기 제거 성능을 평가해보았다. MgO, CeO₂, Al₂O₃, ZnO, TiO₂ 등의 나노결정입자와 NaHCO₃ 등의 일반입자를 사용하였다. 실험은 입자를 30초, 1분, 2분 간격으로 연기에 분사하여 시간에 따른 연기 제거 성능을 관찰해 보았고, 아울러 3, 6 kgf/cm² 등의 입자 분사 압력 변화에 따른 연기 제거 성능도 평가해 보았다. 평가 결과, TiO₂ ≃ MgO > ZnO > CeO₂ > NaHCO₃ > Al₂O₃의 순으로 연기 제거 성능이 우수하였다. MgO와 TiO₂를 분사한 경우 자연스럽게 연기가 제거 되는 속도보다 약 10배 정도로 빠르게 연기가 제거되었다. 분사압력이 6 kgf/cm²에서 3 kgf/cm²로 감소하면, 입자가 연기와 부딪히는 힘이 약하고 분출량이 작아서 연기 제거 성능도 아울러 감소한 것으로 판단된다. 연기 제거 성능은 입자의 특성, 분출 압력, 분출 양, 분사 노즐의 크기 등에 영향을 받는다. 따라서 효과적인 연기 제거를 위해서는 이러한 조건을 최적화하는 것이 중요하다. 본 연구는 이러한 연기 제거 입자가 실제 화재에 적용하는 것을 최종적 목표로 한다.

1. 서 론

일반적으로 화재로 인한 연기는 비휘발성 무기성분의 재뿐만 아니라 질소산화물, 황산화물, 이산화탄소, 탄소입자, 타르, 응축된 에어로졸형태의 물 등의 많은 물질을 포함한다. 특히 산소가 부족하면 독성이 있는 일산화탄소, 시안화수소, 암모니아, 질소산화물 등의 생성이 쉬워진다. 염소 원소를 포함한 재료가 연소가 되면, 포스젠과 염화수소같은 유독성 가스를 생성한다. 일반적인 연기 입자의 크기는 0.1~1 μm이며, 연기 물질의 빛 산란, 흡광 특성은 연기로 인한 시야의 감소에 크게 영향을 미친다.¹

화재 현장에서는 이러한 연기가 발생한다. 특히 연기는 피난자와 소방관의 시야를 가리고 앞에서 언급한 인체에 유해한 물질을 포함하고 있다. 영국의 소방 통계 자료에 의하

면 화재로 인한 사망 희생자 총 593명 중 301명이 연기(가스포함)에 의해 사망하였음을 보고하였다.² 화재가 발생하였을 때 연기가 빠르게 제거가 된다면 화재 진압과 인명 구조에 있어서 큰 효과가 기대된다. 그 동안 연기를 제거하는 것은 주로 제연 설비만을 머릿속에 떠올려 왔지만 연기를 빠르게 제거하는 물질이 있다면 실제 화재 진압에서 큰 역할을 할 수 있을 것이라 판단된다. 하지만 기능성 물질을 사용한 연기 제거 기술은 거의 알려진 바 없다.

최근에 발표된 논문은 반응 비표면적이 큰 것으로 알려진 나노결정의 무기물 입자가 연기 제거에 효과가 있음을 소개하였지만 연기발생기를 통한 실험실 수준에서의 연구만을 수행하였다.³ 본 연구에서는 이러한 나노결정입자 및 기존 소화약제/혼합물 등이 연기발생장치에서 발생한 연기뿐만 아니라, 최종적으로 화재시 연소로부터 발생한 연기 제거에 효과가 있는지 검증하고자 한다.

2. 실험 장치 및 재료

연기실은 60cm × 60cm × 180cm의 밀폐 공간으로 측면판 2개의 정중앙(90 cm, 30 cm)에 레이저와 광감지센서를 각각 설치하였다(그림 1). 연기가 시야를 가리는 정도는 광감지 센서의 전압으로 감지하여, 이 신호를 Agilent 34970A 데이터 수집 장치와 노트북을 사용하여 획득하였다.

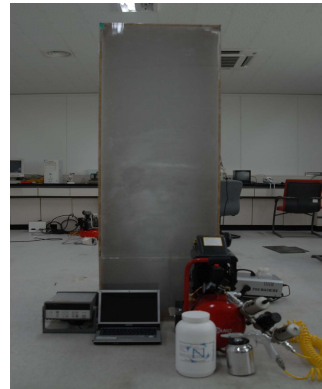


그림 1. 연기 제거 실험 장치

연기발생장치(1200W, KIC사)를 사용하여 폴리하이드리드 알콜 및 폴리옥시에틸렌(REX-10, KIC사)의해 생성된 연기를 10초간 주입하였다. 연기 제거 입자는 소화약제로 사용되고 있는 탄산수소나트륨(Aldrich사)과 NanoScale사의 5가지의 나노결정입자(표1 참고) MgO(NanoActive MgO plus), Al₂O₃(NanoActive Al₂O₃ plus), TiO₂(NanoActive TiO₂) ZnO(NanoActive ZnO), CeO₂(NanoActive CeO₂)를 사용하였다.⁴ 나노결정입자는 기공이 존재하며 나노미터 크기의 결정이 서로 결집되어 있는 형태(그림2~3)로 결집 입자의 평균 크기는 4~12 μm이다. 따라서 폐를 통해 흡수되어 세포내로 입자가 침투할 수 있는 크기보다 나노결정입자의 크기가 훨씬 커 인체 유해성의 측면에서도 우수하다⁵. 연기 제거 입자를 분출시에는 컴프레서(2.5 HP, 계양사)와 샌딩 건(F/G사, 노즐 6.0 mm)을 사용하였다.

표 1. 나노 결정 입자의 특성⁴

	MgO	Al ₂ O ₃	TiO ₂	ZnO	CeO ₂
Specific Surface Area	600 m ² /g	550 m ² /g	500 m ² /g	70 m ² /g	50 m ² /g
Crystallite Size	≤ 4 nm	Amorphous	Amorphous	≤ 10 nm	≤ 7 nm
Average Pore Diameter	30 Å	110 Å	32 Å	170 Å	70 Å
Mean Aggregate Size, d _{0.5}	12 μm	5 μm	5 μm	4 μm	9.5 μm

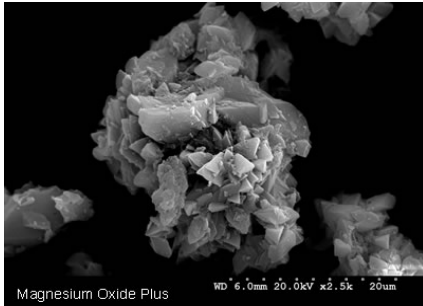


그림 2. MgO의 전자현미경 이미지⁴

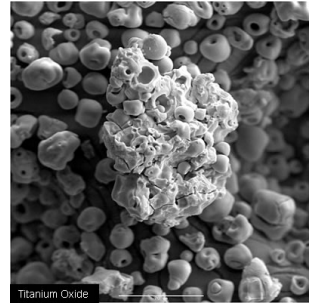


그림 3. TiO₂의 전자현미경 이미지⁴

2. 실험 결과 및 토의

그림 4의 경우 연기발생장치를 사용하여 연기실에 10초간 연기를 주입한 후, 50초 후에 일정 시간 간격으로 MgO를 연기실에 주입한 후 실시간으로 광감지센서의 전압을 측정하는 그래프이다. 실험 종료 전압은 0.3V로 연기가 어느 정도 제거되어 시야가 조금씩 확보되는 전압이다. 입자 분사 간격을 30초, 1분, 2분 간격으로 각각 측정해 본 결과 0.3V 도달 시간은 5.3분, 7.2분, 12.6분(연기 주입 후 입자 분사는 1분 후에 시작하여 실제 측정 시간에서 1분을 뺀 시간임)으로 각각 측정되었고 시간 간격을 줄수록 연기 제거의 효과가 더 컸다. 입자 분사에 시간 간격을 두고 실험한 이유는, 입자가 연기 제거에 쓰일 수도 있지만 오히려 시야를 가릴 수도 있기 때문에, 입자와 연기가 가장 효율적인 반응시간을 알아보기 위해서였다. 하지만 본 실험에서는 단순히 빠르게 입자를 분사하면 연기가 빠르게 제거되는 결과를 얻었다.

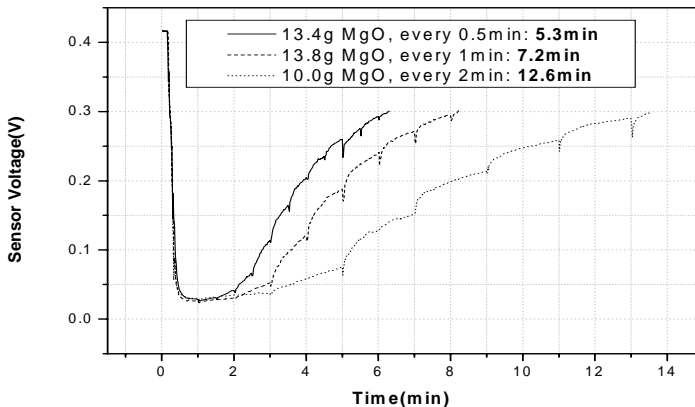


그림 5. NanoActive MgO plus를 일정 시간 간격으로 연기실에 분사하여 연기가 제거되는 것을 시간에 따라 센서의 전압으로 기록한 그래프.

그림 5의 경우 그림 4와 마찬가지로 먼저 연기발생장치를 사용하여 10초간 연기를 채운다. 그리고 1분 후에 아래와 같이 6종의 입자들을 30초 간격으로 연기에 분사한 후 센서 전압이 0.3V로 도달하는 시간을 측정하였다. 실제로 연기가 자연스럽게 제거되어 0.3V로 도달하는 시간은 약 53.0분이었다. 가장 성능이 좋아 0.3V 도달시간이 가장 짧은 입자는 MgO(5.3분)와 TiO₂(5.4분)로 자연스럽게 연기가 제거되는 것에 비해 10배 정도의 연기 제거 속도의 향상을 가져 왔다. 따라서 TiO₂≒MgO > ZnO(6.5분) > CeO₂(13.3분) > NaHCO₃(18.9분) > Al₂O₃(22.4분)의 순으로 연기 제거 성능이 향상 되었다. 특히 소화약제로 쓰이는 NaHCO₃는 나노결정입자인 Al₂O₃보다 연기 제거 성능은 더 우수한 것으로 관찰되었고, 연기제거 성능은 우수하지 않지만 연기 제거의 성능을 가지고 있었다.

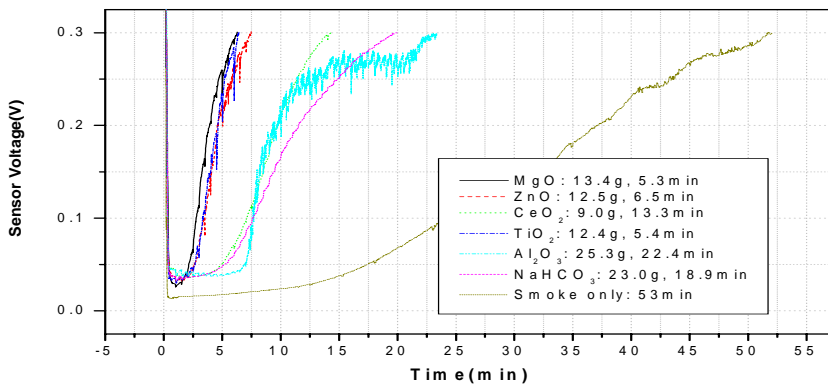


그림 6. 6종의 연기제거입자를 30초 간격으로 연기에 분사하여 시간에 따라 광감지 센서의 전압변화를 나타낸 그래프.

그림 6에서는 입자의 분사 압력에 따라 연기 제거의 성능을 평가하였다. 압력이 2분의 1로 감소하면, 입자 분사의 양이 MgO의 경우 13.4g에서 9.1g으로, TiO₂의 경우 12.4g에서 4.9g으로 감소하고, 0.3V 도달 시간도 각각 5.3분에서 13.6분, 5.4분에서 11.1분으로 증가하였다. 따라서 분사압력이 6 kgf/cm²에서 3 kgf/cm²로 감소하면, 입자가 연기와 부딪히는 힘이 약하고 분출량이 작아서 연기 제거 성능도 아울러 감소한 것으로 판단된다.

MgO의 경우 분사 캔에 50g을 넣은 후, 50g의 MgO가 모두 소진될 때까지 6 kgf/cm²의 압력으로 연기에 분사해 보았다(그림 7). 이 경우 연기가 제거되어 광감지 센서의 전압이 0.3V로 도달하는 시간이 4.0분으로 가장 짧았다. 이러한 실험 결과는 빠른 시간 내에 높은 압력으로 많은 양의 입자를 분사하면 연기가 가장 빠르게 제거될 수 있다는 점을 시사한다.

따라서 앞으로 가장 성능이 좋은 MgO와 TiO₂의 나노결정입자를 사용하여, 압력, 분출 노즐의 크기, 분출량, 혼합정도 등을 조절하여 가장 효과적으로 연기를 제거할 조건을 찾을 것이다. 아울러 이 입자들을 실제 가연물에서 발생하는 연기 제거에 효과가 있는지도 검증할 예정이다.

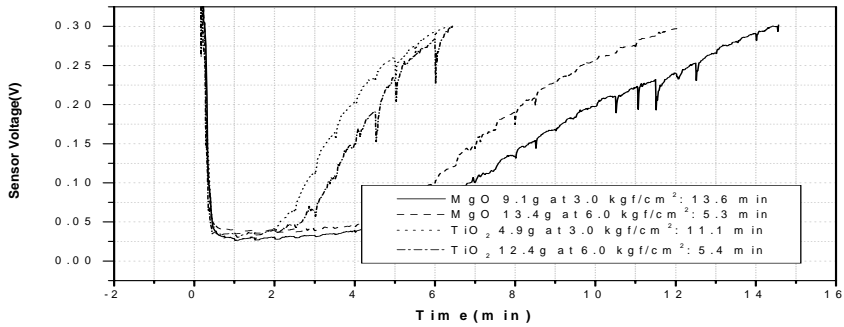


그림 7. MgO, TiO₂의 분사 압력에 따른 연기 제거 성능을 시간에 따라 광감지 센서의 전압으로 나타낸 그래프.

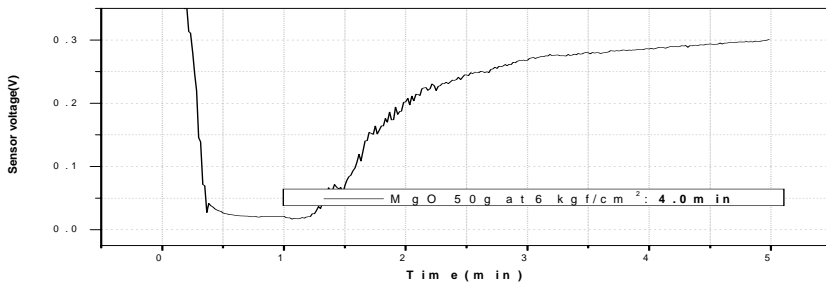


그림 8. MgO 50g을 캔속에 넣고 6 kgf/cm²의 압력으로 모두 분사한 후 연기 제거 성능을 시간에 따라 광감지 센서의 전압으로 나타낸 그래프.

3. 결 론

본 연구에서는 반응 비표면적이 큰 것으로 알려진 나노결정입자의 연기 제거의 효과를 보았다. MgO와 TiO₂의 경우, 자연스럽게 연기가 제거되어 광감지 센서의 전압이 0.3V에 도달하는 시간에 비해 약 10배 빠르게 도달하여, 연기 제거 성능이 다른 입자들 보다 우수하였다. 입자의 압력이 3 kgf/cm² 보다 6 kgf/cm²일 때 연기 제거 성능이 더 우수하였다. 앞으로 여러 가지 실험적 변수를 조절하여 가장 효과적인 연기 제거의 조건을 찾아야 하겠다.

참고문헌

1. G. W. Muholland, "Smoke production and properties", *SFPE Handbook of Fire*

- Protection Engineering, 2nd Edition, Chapter 15, Section2, 2-217pp.*
2. Fire Statistics, United Kingdom, 2003, Office of Deputy Prime Minister.
 3. R. Yadav, R.G. Maghirang, L.E. Erickson, B. Kakumanu, S.G. Castro, "Laboratory evaluation of the effectiveness of nanostructured and conventional particles in clearing smoke in enclosed spaces", *Fire Safety Journal*, **2008**, *43*, 36.
 4. Visit <http://nanoactive.interkan.net/>.
 5. G. Oberdörster, E. Oberdörster, J. Oberdörster, "Nanotoxicology: An Emerging Discipline Evolving from Studies of Ultrafine Particles", *Environmental Health Perspectives*, **2005**, *113*, 823.