

In-situ로 생성된 나노 입자를 이용한 소각장치로부터의 수은의 배출제어

현정은 · 이태규

1. 서론

환경적으로 지속 가능한 발전을 실현하기 위해 필수적인 환경오염물질 배출제어에 있어서 가장 효과적인 방법 중 하나가 환경촉매를 사용하는 것이다. 지난 20여 년 동안, 환경촉매의 사용은 주로 이동오염원의 배출물질제어에 국한되다가 점차 폐기물 정화, 에너지 산업, 정유 산업, 나아가 실내오염 정화 등의 환경과 관련된 산업으로 점차 확대되고 있는 실정이다. 환경촉매는 나노 입자를 만드는 기술 (Nano Technology, NT)의 환경분야 (Environmental Technology, ET)에의 적용이라는 융합기술 (Converging Technology, CT)로서 새로운 의미를 지닌다.

현재까지 국내에서는 대기 환경 중의 오염물질을 제거하기 위하여 많은 정화기술을 개발하여 왔다. 이

들 기술개발의 대부분은 대기 중에 포함되어 있을 경우 대기 중의 농도 증가로 인해 인체에 해를 유발하는 성분인 황산화물과 질소산화물 황사 오존 등의 물질 저감을 목표로 수행되어 왔다. 하지만 장기적으로 환경과 인체에 치명적인 해를 가져 올 수 있는 수은이나 비소 미세 먼지같은 특정 유해물질은 대기 중에 차지하는 비율이 아주 작다는 이유로 무시되어 왔고 이에 대한 기술개발은 거의 이루어지지 않았다. 특히 수은과 같은 경우는 높은 휘발성, 체내 축적성과 원소수은으로 배출된다는 점에서 더욱 관심의 대상이 되고 있다. 이들 성분들은 대기 중에 포함된 비율로 보아서는 아주 작지만 총량으로 볼 때의 배출량은 결코 무시할 수 없으며 대기 중에 포함되어 방출되는 특정유해물질로 인한 환경오염과 인체에 미치는 악영향이 부각되면서 이를 저감하기 위한 정책 마련과 기술개발의 필요성이 대두



현정은

2002 연세대학교 화학공학과 (학사)
2002~ 현재 연세대학교 화학공학과 석사과정



이태규

1987~ 연세대학교 화학공학과 (학사)
1991
1991~ Massachusetts Institute of Technology (석사)
1995 University of Cincinnati (박사)
1995~ 1999
1999~ Adjunct Assistant Professor
2000 University of Cincinnati
2000~ Research Assistant Professor
2001 University of Cincinnati
2001~ 한국과학기술연구원 대기지원연구센터 선임연구원
2002 연세대학교 화학생명공학부/
2002~ 현재 화학공학전공 조교수

In-situ Generated Nanoparticles for the Removal of Elemental Mercury from Combustion Flue Gas

연세대학교 화학공학과 (Jung Eun Hyun and Tai Gyu Lee, Department of Chemical Engineering, Yonsei University, 134 Sinchon-dong, Seodaemun-gu, Seoul 120-749, Korea)
e-mail: teddy.lee@yonsei.ac.kr

되었다. 대기 중에 포함된 수은, 비소 등의 특정유해 물질은 전 대기오염 물질의 양과 비교할 때 극소량 이어서 기존에 다른 공정에서는 이들 성분을 제거 하기 위한 기술이 개발되지 않았다.

수은의 각종 오염원에서의 배출량에 관한 자료는 국내의 경우 아주 미비한 상황이다. 대신 미국의 예를 들자면 (US EPA, 1998), 이미 인위적인 활동으로 인한 수은의 배출량이 자연적인 배출량을 넘어섰고, 지구 전체를 기준으로 기체상태로 배출되는 인위적인 수은의 배출량은 연간 1000~6000 톤에 이르는 것으로 보고되고 있다.¹ 인위적인 활동에 의한 수은의 배출 중에서도 각종 연소장치에서의 배출이 대부분을 차지하는데, 석탄에 의존하는 발전소들과 쓰레기 소각장치들이 그 예이다. 수은 배출량의 경우 정량적으로 파악된 모든 연소장치에 의한 배출량이 미국의 경우 전체 배출량의 80%를 차지하는 것으로 알려져 있다.² 배출되는 수은의 형태에 대해서는 아직까지도 아주 신뢰할만한 채집, 분석 방법이 없는 것으로 인해 단언하기 힘든 것이 사실이다. 오랫동안 수은 분석기술개발에 투자를 해온 미국만 해도 계속해서 US EPA가 추천하고 인증하는 채집방법이 바뀌고 있는 실정이다. 가장 최근에 공인된 Ontario Hydro Method라는 채집법도 이미 몇 가지 약점으로 인해 공격의 대상이 되고 있는 실정이다. 하지만 지금까지의 가능한 방법으로 채집, 분석한 결과는, 석탄을 원료로 하는 연소장치의 경우 주로 수은이 기상의 원소상태로 배출됨을 보여주고 있다.³

연소가스내의 중금속을 제거하는 대표적인 방법으로는 크게 흡착을 들 수 있다.⁴ 그러나, 수은의 경우는 높은 휘발성으로 인해, 물리적인 흡착만으로는 수은을 제거하기가 힘들다. 따라서 원소수은의 제거에 있어서는 흡착보다는 산화를 시키는 것이 연소가스를 통한 수은의 배출을 제어하는 데 더 효과적일 수 있는데, 그것은 일단 원소상태의 수은이 산화가 되면 ($Hg^0 \rightarrow Hg^{2+}$), 약한 산성을 띤 용액에도 훨씬 증가된 수용성을 갖게 되기 때문이다 (원소수은은 중성의 수용액에서 거의 제로에 가까운 용해도를 갖는다). 발전소 등에서 많이 사용되는 습식탈황장치 (wet scrubber)의 약산성을 띤 수용액을 이용하여 산화수은을 용해시켜 연소가스 중에서 제거할 수 있다. 그러나, 이 방법 또한 그 적용이 쉽지 않은 것이, 원소수은은 전자구조가 $5d^{10}6s^2$ 의 닫힌 구조를 갖고 있기 때문에 반응성이 아주 낮고 따라서

기상에서의 산화가 쉽게 일어나지 않기 때문이다. 이러한 이유들로 인해, 수은의 배출을 최소화하려는 연구는 거의 대부분 원소상태의 수은을 대상으로 하고 있다.

현재 가장 보편적인 수은의 배기가스에서의 제거 방법은 흡착제를 이용하는 것이다. 그 중에서도 활성탄이 흡착제로서 가장 많이 사용되고 있는데, 활성탄의 경우도 엄밀하게는 순수한 물리적인 흡착으로만 보기는 힘들다. 활성탄 자체가 수은에 특별한 화학적 친화력 (chemical affinity)을 가진 것으로 추정되고 있다. 최근에는 활성탄의 화학적 친화력을 극대화하기 위해서 황이나 요오드와 같은 화학 물질을 첨착하는 방법이 사용되기도 한다. 활성탄은 주로 분무식 (injection method)을 많이 쓰고 있는데, 수은의 배출농도가 높은 쓰레기 소각장치 등에서는 높은 효율을 보이지만 화력발전소와 같이 아주 낮은 농도의, 그것도 원소상태의 수은으로 배출되는 경우 그 효율이 높지 않은 것으로 알려져 있다. 또한 활성탄을 이용하는 경우, 높은 가격에도 불구하고, 낮은 적용온도범위, 느린 흡착속도, 낮은 재활용률 등이 문제점으로 지적되고 있다.

따라서 지금 수은의 배출제어연구에 있어서 가장 중요하고 시급한 것은 활성탄을 비롯한 기존의 흡착제들을 대신할 수 있는 새로운 흡착제를 찾아낸 후, 그에 맞는 적용기술을 개발하고, 검증하며, 마지막으로 가장 효율적인 operating condition을 찾아내는데 있다. 이러한 의미에서 앞으로 기술할 *in-situ*로 생산되는 이산화티타늄의 수은제거에의 응용기술은 나노 촉매를 이용한 NT 분야와 ET 분야를 접목시키는 기술로서 그 가능성을 제시해 준다.

2. *In-situ* generated 나노 입자를 이용한 수은의 배출제어

2.1 *In-situ* Vapor Phase Sorbent Precursor Injection Technology

그림 1에서 보는 바와 같이 기체상태에서 나노미터 크기의 흡착제 입자들을 *in-situ*로 생성시켜 목표하는 오염물질들을 흡착시키는 기술이 최근에 개발된 후, 활발히 연구되고 있다.

이 새로운 기술의 장점으로서는 첫째, 흡착제의 크기와 모양을 원하는 대로 생성시킬 수 있다는 것이며, 둘째, 생성된 흡착제들이 agglomerate의 형태

● Target Species (g) ● Sorbent Precursor (g) ● MeOx (g) ● MeOx (s)

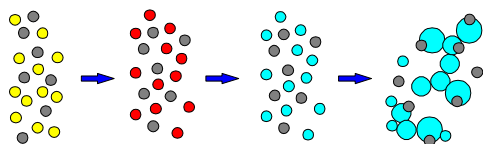


그림 1. 제안된 새 기술을 이용한 기상의 중금속오염물질의 배출제어.

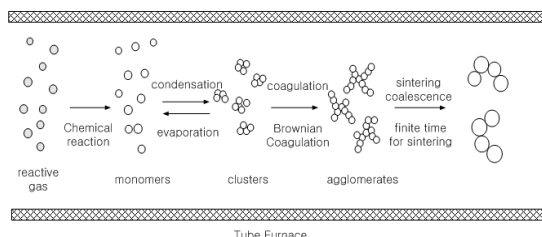


그림 2. 전기로에서의 입자의 생성.

를 가지며 (그림 2), 또한 단위 입자가 나노미터 크기 (10~20 nm)를 가지기 때문에, 단위 질량당 표면적 (specific surface area)이 같은 질량을 가지는 구 (sphere) 형태의 mm 크기의 기존 흡착제들에 비해 상대적으로 높다는 것이다. 셋째, 흡착제의 형태가 열린 구조 (open structure)로 만들어지기 때문에 목표로 하는 오염물질 (중금속)의 흡착제 표면으로의 접근이 용이하다는 것이며, 마지막으로, 흡착제입자의 생성으로 기체의 중금속들이 작은 입자를 형성하는 자체를 막을 수 있다는 데 있다. 이 점이 중요한 이유는, 각종 입자제거장치들 (백필터, 전기집진기)이 산화중금속입자의 전형적인 배출 크기에서 가장 낮은 제거효율을 갖기 때문이다. 이 잡기 힘든 중금속이 입자로 변환되는 것을 근본적으로 차단할 수 있다는 것은 아주 고무적인 일이다. 일례로 납 (Pb)의 경우, 이 새로운 기술을 이용하여 SiO_2 를 *in-situ*로 생성시키고, 물리적인 흡착을 통해 100%에 가까운 납 제거 효율을 얻었다.

2.2 원소수은의 제거

2.2.1 Chlorine, Sulfur의 영향

원소수은의 경우는 위에서 이미 언급한 바와 같이 높은 휘발성으로 인해 일반적인 흡착제로는 제거하기가 힘들다. 대표적인 세 가지의 흡착원료를 이용하여 그들의 수은 제거효율을 조사하였는데,⁵ 그것은 Si-, Ca-, 그리고 Ti- 이다. 이미 제안된 기술 (Vapor Phase Sorbent Precursor Injection Technology)을 이용하면, 각각 *in-situ*로 agglomer-

ate형태의 SiO_2 , CaO, 그리고 TiO_2 를 생성하게 된다. SiO_2 는 Pb (납)의 제거에 있어서 탁월한 효율을 보였기 때문에 선택되었고, CaO는 이미 황의 제거를 위해 널리 사용되고 있으므로 일석이조의 효과를 노릴 겸해서 선택되었다. 마지막으로, TiO_2 의 경우, 이미 광촉매로서의 그 성능이 입증된 바, 원소수은의 흡착 또는 산화와의 가능성을 염두에 두고 선택하였다.

표 1에서 볼 수 있듯이, 우선 SiO_2 와 CaO는, 광반응성이 없는 관계로 자외선 (UV)을 쬔었을 때나 안 쬔었을 때나 같은 결과를 보이고 있다. SiO_2 의 경우, 원소수은의 제거효율이 거의 제로에 가깝다. 그것은 실리카 흡착제가 전적으로 물리적인 흡착만을 통해 오염물질을 제거하기 때문이다. 다른 중금속과는 달리 원소수은은 그 높은 휘발성으로 인해 물리적인 흡착만으로는 기상의 원소수은을 제거할 수 없다. CaO의 경우, 널리 알려진 바와 같이 그 자체가 매우 높은 chemical affinity (화학적 친화력)를 가지므로 기본적으로 원소상태의 수은을 흡착해냄을 보여주고 있다. 자외선을 쬔어주지 않는 조건에서 TiO_2 는 제로에 가까운 효율을 보이는데 그것은 자외선이 없는 조건에서 TiO_2 는 광반응성을 띄지 않기 때문에 SiO_2 의 경우와 마찬가지로 물리적인 흡착만을 하기 때문이다. 주목할 만한 것은 TiO_2 경우로서 자외선을 쬔어주는 조건에서 수은을 100% 가까운 효율로 제거하고 있다. 이것은 화력발전소와 같이 저농도로 원소수은을 배출하는 경우에 있어서 아주 고무적인 결과이다.

화력발전소에서의 경우, 실제로 무연이나 유연탄을 태우게 되면 농도의 차이는 있지만 수습에서 수백의 다른 종류의 화학물질들이 발생하게 된다. 가장 대표적인 발생물로 입자상의 fly ash와 기상의 황, 염소 화합물들을 들 수 있다. Fly ash의 경우, 그 성분이 주로 iron oxide와 SiO_2 계열이며 황, 염소 화합물로는 대표적으로 SO_2 와 HCl이 있다. 따라서, 석탄 연소시에 발생하는 실제의 배가스에 가깝게 simulation 하기 위해 배가스 성분 중 가장 큰

표 1. 나노 흡착제의 원료물질에 따른 수은 제거효율 비교

흡착제 종류	without SO_2	with SO_2
TiO_2 only	< 2%	< 2%
TiO_2 with UV	98.6 %	55~64%
CaO with and without UV	33.2 %	18~24 %
SiO_2 with and without UV	~0 %	~0 %

비중을 차지하는 SO_2 와 HCl 을 주입하였다. SO_2 의 경우, 유한수의 active site를 원소수은과 SO_2 분자가 경쟁적으로 차지하게 되므로 원소수은만을 고려할 때는 제거 효율은 조금 낮아졌으나 주입되는 TiO_2 의 양을 아주 조금만 증가시킴으로써 고효율을 다시 회복할 수 있었다.⁶ 모사된 석탄연소 배가스에 HCl 을 첨가한 경우에는 $\text{TiO}_2 + \text{UV}$ 에 의한 원소수은의 흡착과정이 전혀 영향을 받지 않았으며,⁷ 오히려 염소가 기체상태의 수은을 산화시킴으로써 연소가스 중의 원소수은의 농도를 더욱 저감시키는 효과를 가져왔다 (표 2). 마지막으로, SiO_2 를 주입함으로써 연소 배가스 중의 fly ash를 모사한 결과, 어느 정도 이상의 습도가 유지될 경우 (약 5%), TiO_2 표면의 OH 라디칼 생성에 필요한 충분한 양의 물분자가 공급됨으로써, $\text{TiO}_2 + \text{UV}$ 를 통한 원소수은의 흡착과 산화에 별다른 영향이 없는 것으로 관찰되었다. 최소한의 습도가 유지되어야 하는 이유는, SiO_2 가 어느 정도 물분자를 흡수하는 경향이 있기 때문이다 (실제로 실리카겔은 흡수제로서도 많이 쓰이고 있다).

그림 3에 TiO_2 가 *in-situ*로 생성된 후, 자외선이 공급되는 조건하에서 연소가스 중의 원소수은을 제거하는 일련의 과정들이 나와 있다. 기체 상태로 주입되는 Ti의 precursor는 바로 고온에서 TiO_2 로 산화되고 반응온도가 떨어지면서 기체에서 고체로 나노미

표 2. 염소(Cl)가 $\text{TiO}_2 + \text{UV}$ 에 의한 원소수은의 제거효율에 미치는 영향

System	Elemental Hg Removal Efficiency [%]
Air+Hg+HCl	12.61
Air+Hg+HCl+UV	17.39
Air+Hg+HCl+Ti+UV	94.78

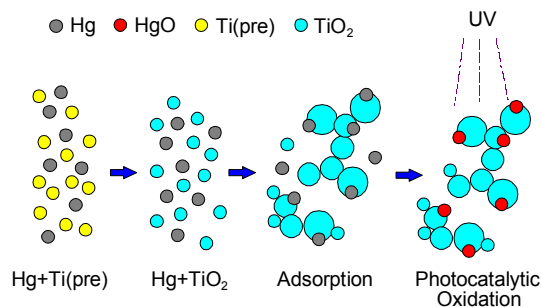


그림 3. *In-situ*로 생성된 $\text{TiO}_2 + \text{UV}$ 에 의해 원소수은이 제거되는 과정.

터 크기의 입자들을 생성하기 시작한다 (nucleation). 이 단위 입자들은 그 후에 condensation, coagulation, sintering 등의 과정을 거쳐 포도송이 같이 생긴 agglomerate들을 생성한다 (그림 2). 이 때 기체의 원소수은들이 TiO_2 입자표면에 흡착되나, 휘발성으로 인해 곧 탈착된다. 그러나, TiO_2 입자들에 자외선 (UV)을 쬌어주게 되면 TiO_2 특유의 광반응성으로 인해 표면에 OH 라디칼을 형성하고 이것이 원소수은을 산화시킴으로써 TiO_2 와 HgO 사이에 강한 화학결합을 생성하여, 배가스로부터 원소수은을 제거하게 된다 (그림 4).⁸

이러한 $\text{TiO}_2 - \text{HgO}$ 복합물은 그 후로도 크기와 형태의 조절을 통해 가장 높은 효율로 제거가 되게끔 engineering을 할 수 있다. 그림 5는 이 실험에 실제로 사용된 장치를 보여주고 있다.

TiO_2 입자에 흡착된 수은이 어떤 형태의 수은인지를 확인하기 위해 찍은 XRD pattern이 그림 6에 나와 있다. 자외선을 쬌어주지 않은 경우, TiO_2 만 보이지만 (a), 자외선을 쬌어준 경우, 앞의 경우에는 없었던 HgO 피크가 나타났음을 알 수 있다(b).

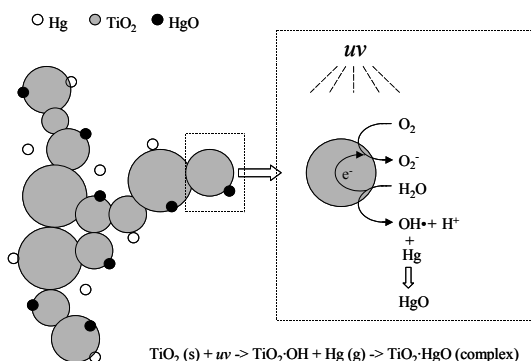


그림 4. 광반응에 의한 TiO_2 표면에서 원소수은의 화학흡착과정.

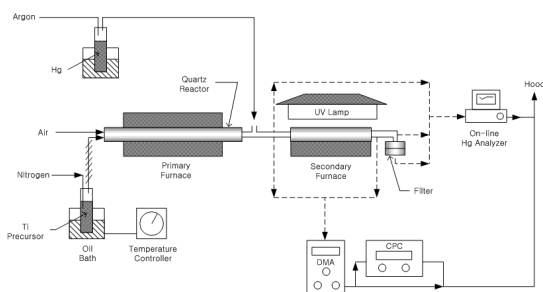


그림 5. *In-situ* 방법의 연구를 위해 사용된 실험장치.

2.2.2 입경에 따른 수은의 제거효율의 비교

Fractal dimension은 생성된 입자들의 특성을 설명하기 위한 하나의 방법이다. Agglomerate의 구조는 보통 fractal dimension을 통해 나타내는 데, 이 수치가 낮을수록 열린 구조를, 높을수록 닫힌 구조를 갖게 된다.⁹ 예를 들면, 선의 형태인 경우, fractal dimension의 값은 1에 가깝고, 면의 형태인 경우에는 2에 가까운 값을 가진다. 완전한 구의 경우, 3을 가지지만 조금이라도 구에서부터 열린 구조를 지니면 3에 못 미치는 값을 가지게 된다. **그림 7**은 생성된 입자들의 TEM 사진들이다. 생성온도가 상승

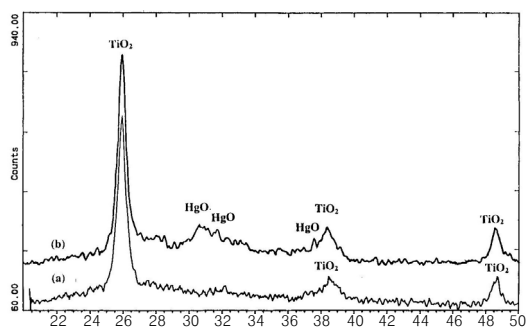


그림 6. 자외선 유무에 따른 배가스 처리후의 결과를 성분비교 (XRD).

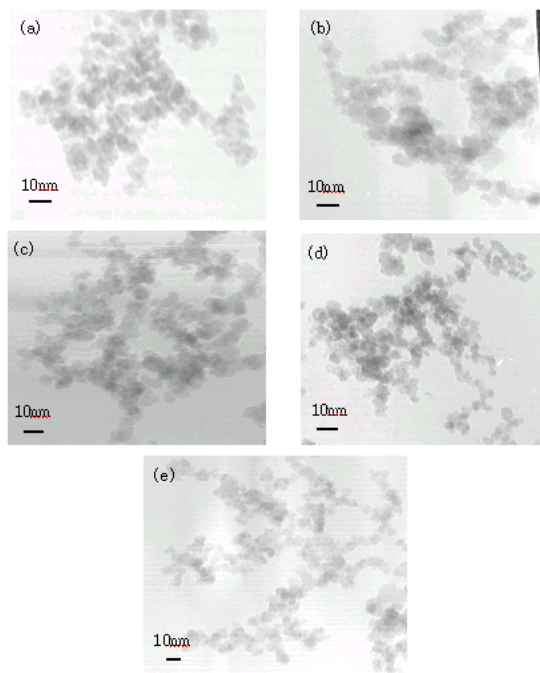


그림 7. TEM 사진을 통한 온도에 따른 이산화티타늄의 morphology.

함에 따라 agglomeration이 빨라지면서 입자는 오히려 선형에 가까워진다는 것을 알 수 있다. **그림 8**에서 볼 수 있듯이 입자가 커짐에 따라서 선형에 가까워지면서 β ratio는 감소하고 radius of gyration 값은 증가함을 나타내고 있다.¹⁰ 이는 또 다른 의미에서 입자가 열린 구조가 되어 감을 뒷받침해주고 있다고 할 수 있으며 이러한 **그림 7**을 **표 3**에 나타내었다.

그림 8, 9, 10에서 언급하고 싶은 몇 가지는 다음과 같다. 첫째, 입자의 지름으로 표현된 agglomerate 입자의 크기가 커질수록 fractal dimension의 값이 감소하는 것을 알 수 있다. 다시 말해서, **그림 9**에서 보여 지는 바와 같이 agglomerate 입자의 크기가 커질수록 어느 정도 linear 하게 fractal dimension 값이 작아지면서 점점 더 열린 구조로 바뀌는 것을 알 수 있다. 둘째, *in-situ* 방법을 사용하여 우리가 원하는 크기와 형태의 흡착제를 생성하는 것이 가능함을 보여준다는 것이다. 흡착제가 열린 구조를 가질 때의 장점은 이미 거론한 바와 같이 제거를 목표로 하는 기상의 오염물질의 흡착제 표면으로의 접근이 용이하다는 것이다. 따라서 **그림 10**과 같이 입자의 크기가 증가하면서 오히려 수은의 제거효율이 증가하는 경향성을 보인다. 특히, 앞으로 거론이 될 TiO_2 를 사용하여 수은을 제거하는 방법에 있어서 자외선이 이산화티타늄의 표면에 도달하는 것이 매우 중요한데, 열린 구조의 경우 그것

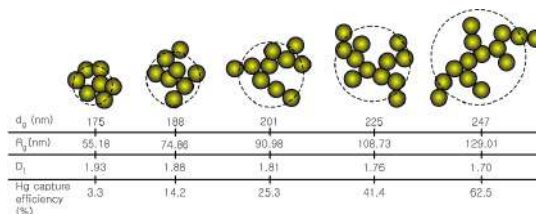


그림 8. 생성된 나노 입자의 크기변화에 따른 구조 및 형태의 변화.

표 3. 온도의 영향에 따른 입경의 변화

Set No.	Synthesis temperature (°C)	Geo. mean diameter (nm)	Radius of gyration	Fractal dimension	β ratio	Hg capture efficiency (%)
1	500	175	55.18	1.93	1.38	3.3
2	650	188	71.86	1.88	1.35	14.2
3	750	201	90.98	1.81	1.30	25.3
4	850	225	108.73	1.76	1.26	41.4
5	1000	247	129.01	1.70	1.22	62.5

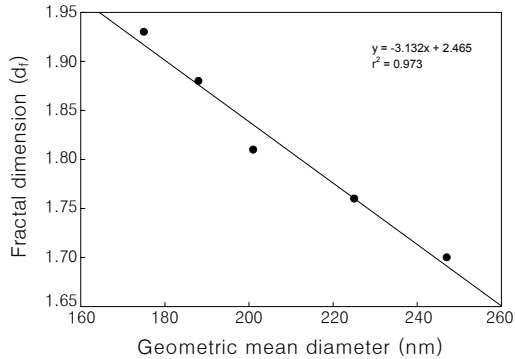


그림 9. 생성된 나노 입자의 크기에 따른 fractal dimension의 변화.

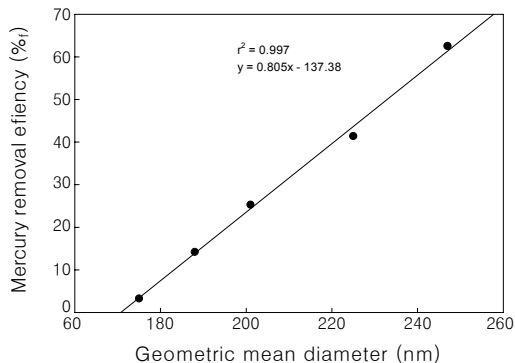


그림 10. 입자의 크기에 따른 수은의 제거효율.

이 닫힌 구조에 비해 훨씬 용이하다는 것이다. 마지막으로, 결과물의 흡착제 형태가 아주 작은 (10~20 nm) primary 입자들로 이루어진 agglomerate이라는 점이다. 왜냐하면, 이러한 입자들은 같은 질량을 가진 bulk 형태의 흡착제들에 비해 훨씬 큰 표면적을 가지기 때문이다. 위의 실험은 입경에 따른 수은의 제거효율의 차이를 알아보기 위한 것이었기에 50% 안팎의 제거효율을 나타내는 조건하에서 수행하였음을 밝힌다. 또한 분말형태의 TiO_2 는 형광등 및 햇빛하에서도 100% 가까운 수은 제거효율을 보였으며, Vapor Phase Sorbent Precursor Injection Technology를 이용, *in-situ*로 생성된 TiO_2 역시 자외선등 대신 형광등이나 햇빛하에서도 충분히 100%까지 수은을 제거할 수 있을 것이라 생각된다.¹¹

2.2.3 실제 장치로의 접근 가능성

본 연구에서는 자외선 램프 ($\sim 900 \mu\text{W}/\text{cm}^2$)를 이용하여 자외선을 주사하였지만 실제 발전소의 경우는 전기집진기에서 발생하는 코로나 (corona)에서 충분한 세기 ($\sim 1 \text{ mW}/\text{cm}^2$)의 자외선이 방출되

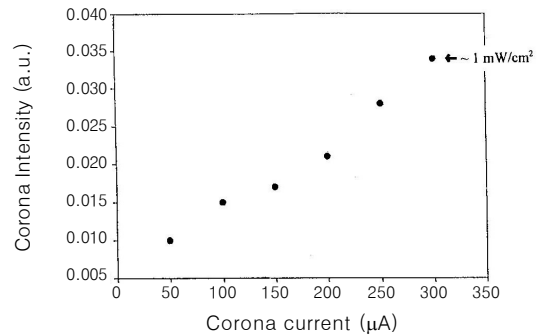


그림 11. 실제 전기 집진기에서의 코로나의 자외선 세기의 측정.

기 때문에 특별한 부속장치 없이 그대로 이 기술을 적용할 수 있을 것이라 기대된다 (그림 11).

배가스가 전기집진장치를 들어갈 때의 온도는 보통 섭씨 150~200 °C 사이이다. 그 온도범위에서 어느 정도 효율을 가지는지를 알아보기 위한 실험을 수행한 결과가 100%까지 나왔다. 따라서 실험조건을 조절하면 실제 전기집진기내에서도 충분히 수은제거가 가능함을 알 수 있으며, 분말형태의 TiO_2 를 이용한 실험결과에 의하면, 형광등 또는 햇빛 등의 광원하에서도 100%에 가까운 효율이 얻어짐을 알 수 있다.¹¹

3. 결론

ET 분야에서 환경문제해결을 위해 제안되는 어떤 종류의 기술이나 정책이 경제적인 측면에서 경쟁력을 가지는가 하는 것은 환경관련 연구에서 매우 중요하다. 아무리 기술이 뛰어나도 높은 운용비 때문에 쓰이지 않는 환경기술이 허다한 것이 현실이다. 최근의 예를 들어봐도, 경제논리에 막혀 환경정책이 제대로 진행되지 않는 것을 보면 경제성이 얼마나 중요한지 알 수 있을 것이다 (자동차 오염물질 배출량 규제 등). 실제로, 연소 배가스 중 수은제거에 있어서 가장 큰 경쟁상대라고 할 수 있는 활성탄 분무법과 이 연구를 통해 제안된 Vapor Phase Sorbent Precursor Injection Technology의 원소수은 제거효율과 각각의 경제성을 비교해보았다. 활성탄 분무법의 효율 및 가격의 산출은 다른 연구자의 연구보고에 기초하여 추정한 것임을 밝혀두는 바이다. 활성탄 1 g에 의해 제거된 수은의 양이 0.4 mg인데 반해 *in-situ*로 생성된 TiO_2 1 g에 의

해 제거된 수은의 양은 150 mg으로 활성탄의 경우보다 약 400배이다. 또한 1 lb의 수은을 제거하기 위해 드는 활성탄 활용기술의 일년 운용비가 \$14000에서 \$38000인데 반해, 같은 양의 수은을 제거하는데 필요한 TiO_2 의 일년 치 비용은 \$4000 정도이다. 따라서, 제안된 기술은 기술적인 측면과 경제적인 측면의 두 가지 큰 관점에서 기존의 원소수은 또는 수은의 제거방법에 비해 유리한 점을 갖고 있다고 하겠다. 우선 기술적인 측면으로는, 별다른 추가적인 고가의 장치없이 기존의 연소장치설비에 그대로 적용할 수 있는 나노 촉매를 이용한 기술 (NT)이라는 점이 유리하다. 또한, 경제적인 측면에 있어서도, 기존의 수은제거방법 중 가장 큰 경쟁상대라고 할 수 있는 활성탄 분무법보다 훨씬 저렴한 운용비로 같은 효율을 얻을 수 있다는 점이 유리하다. 국내외를 통틀어 중금속, 특히 수은의 배출에 관한 관심이 높아지며, 국내 각종 연소장치에서의 수은배출의 규제가 본격적으로 시작되는 지금, Vapor Phase Sorbent Precursor Injection Technology는 NT와 ET의 결합이라는 측면에서도 가장 매력적인 해결방법이 될 것이라 생각한다.

감사의 글 : 본 연구는 한국과학재단 목적기초연구 (R08-2003-000-10214-0) 지원으로 수행되었음.

참고문헌

1. J. O. Nriagu and J. M. Pacyna, *Nature*, **333**, 134 (1988).
2. P. Biswas, *J. Air Waste Manage. Assoc.*, **49**, 1469 (1999).
3. E. Hedrick, T. G. Lee, P. Biswas, and Y. Zhuang, *Environ. Sci. Technol.*, **35**, 3764 (2001).
4. J. Jurng, T. G. Lee, G. W. Lee, S. J. Lee, B. H. Kim, and J. Seier, *Chemosphere*, **49**, 907 (2002).
5. T. G. Lee, E. Hedrick, and P. Biswas, *AIChE J.*, **47**, 954 (2001).
6. T. G. Lee, E. Hedrick, and P. Biswas, *J. Air & Waste Manage. Assoc.*, **52**, 174 (2002).
7. T. G. Lee and P. Biswas, *J. Aerosol Sci.*, **29**, s577 (1998).
8. T. G. Lee, E. Hedrick, and P. Biswas, *Ind. Eng. Chem. Res.*, **43**, 1411 (2004).
9. S. N. Rogak, R. C. Flagan, and H. V. Nguyen, *Aero. Sci. Technol.*, **18**, 25 (1993).
10. T. G. Lee and P. Biswas, *Aerosol Sci. Technol.*, to be submitted (2004).
11. Y. G. Lee, J. -W. Park, J. H. Kim, B. R. Min, J. Jurng, J. Kim, and T. G. Lee, *Chemistry Letters*, **33**, 36 (2004).