

유전체장벽방전(Dielectric Barrier Discharge) 특성을 이용한 자동차 배기ガス에서 공해물질 제거 효율 개선에 관한 연구

신성국, 심재위, 황보승, 권윤혁

호남대학교 전기공학과, LG전선

The research about the improvement of pollutional material elimination efficiency in the waste gas automobile using dielectric barrier discharge characteristics

S. K. Shin, J. W. Shim, S. Hwang-bo, W. H. Kwon
Honam University Electrical Eng., LG Cable Co.

Abstract - 현재 국내에서 많이 연구·개발되고 있는 펠스코로나 방식은 자동차와 같은 소규모 오염 배출 원에 적용하기엔 경제적·기술적 한계를 가지고 있으며, 또한 3원 촉매법과 같은 화학촉매환원법은 사용조건이 엄격하고 일부 오염물질의 저감만이 가능하기 때문에 종합적인 공해물질 저감대책으로서는 한계가 있다. 따라서 자동차와 같은 소규모 오염배출원에 있어서 다양한 배기오염물질의 동시처리가 가능한 경제적이고 종합적인 공해물질 저감방법의 제시는 매우 중요한 당면 과제이다. 이에 따라 본 연구에서는 현재 본 연구팀이 보유한 전기재료 및 방전분석 기술을 바탕으로 최근 국외에서 자동차 배기ガス에서 공해물질의 배출억제 방안으로 활발히 연구되고 있는 유전체장벽방전 방식에 대해 체계적 실험·분석 등을 통하여 보다 효율적인 공해물질 제거방법을 도출하고자 한다.

1. 서 론

유전체장벽방전은 무성방전(Silent Discharge)으로도 불리며, 전극의 한쪽 또는 양쪽 전극 위에 유리(glass) 또는 테프론(Teflon)과 같은 유전체층이 도포되어 있는 구조로서 일반적으로 평대평판형과 실린더형 전극이 사용되고 있다. 특히, 유전체장벽방전 특성을 이용한 기술의 핵심은 미소방전에 의해 유전체 표면에 축적되는 공간전하가 역전 계를 형성시켜 안정된 전력공급이 가능한데 있다. 즉, 방전에너지(전자에너지)는 공간전하에 의해 장벽효과에 의해 영향을 받게 되며, 이러한 장벽효과는 유전체의 표면 및 표면 부근에서의 전도, 절연 및 포획준위(trip level) 등 유전체 자체의 물리화학적 특성과 함께 주파수와 같은 전력공급원의 형태에 의해 크게 영향을 받는다. 본 연구팀은 이와 같은 방전에 의한 공간전하분포와 방전패턴의 동시 측정이 가능한 시스템을 제작하여 실험을 실시하여 왔고 이를 유전체 재료선정에 적용하고자 한다. 한편, 현재 자동차 연료는 탈황공정을 통하여 연소 중 황산화물의 배출을 억제하고 있기 때문에 자동차 배기ガス에서 공해처리 기술은 대부분 SOx보다는 NOx의 제거에 중점을 두고 있다. 유전체장벽방전에 의한 자동차 배기ガ스에서 공해물질의 저감원리는 두 전극사이에 고주파 교류전압을 인가하여 미소방전(Micro-discharge)에 의한 가속전자와 여기 분위기ガス(Background Gas)와의 충돌 등에 의해 분위기ガ스를 일차적으로 공해물질과 반응 성이 강한 반응기(Radicals)로 분해시킨 후, 이러한 반응기와 NOx 및 SOx 등 공해물질과 화학반응을 일으켜 공해물질을 무해 또는 반응이 수월한 2차 물질로 변환하여 제거하는 간접적인 분해방식을 주로 택하고 있다. 이때 분해효율의 향상을 위하여 첨가제(Additives)나 촉매(Catalysts)를 사용하기도 한다. 유전체장벽방전에서의 가스분해는 일반적으로 주입에너지에 의해 분해효율이 결정되는 것으로 알려져 있다 그러나 실제로 이를 적용시킬 경우 주입전력에는 한계가 있고 과다전력이 투입될 경우 오히려 2차반응에 의한 재결합이 이루어질 가능성이 높아지게 된다. 따라서 이 실험에서는 소모전력을 100W 이하로 설계하여 향후 전원장치 제작에 있어 소전력으로 설계를 할 수 있도록 측정을 진행하였다. 인가전압이 3.5kV에서의 주파수에 따른 분해효율은 7kHz 이상의 주파수에서는 over current에 의한 trip이

발생하여 더 이상의 측정이 이루어지지 않았으며 4kHz 이상의 주파수에서 NO의 분해가 나타나기 시작하여 7kHz에서 NO의 경우 60%, 전체 NOx의 경우 약 40%의 분해 효율을 나타내었다. 인가전압이 3.8kV인 경우 5.5kHz에서 current trip이 발생하여 더 이상의 측정이 이루어지지 않았으며 이때의 분해효율은 NO의 경우 70%, 전체 NOx의 경우 약 55%의 분해효율이 나타났다. 인가전압이 4.2kV일 때 4kHz에서의 current trip이 발생하였고 이 때의 분해효율은 NO의 경우 86%, NOx의 경우 약 80%의 분해효율을 나타내었다. 여기에서 알 수 있듯이 적정전류에 가까워질수록 주파수 가속에 의한 분해효율이 높아지는 것을 볼 수 있으며 분해 시작 후의 주파수 가속 효과 역시 빨라지는 것을 알 수 있다. 이는 전원장치의 제작시 주파수 특성을 고정시켜 보다 간단한 전원장치의 제작이 가능하도록 해주며 전력소모도 최소한으로 할 수 있다. 그리고 전기적인 처리만으로도 NOx의 분해가 효율적으로 이루어지는 것을 볼 수 있으며 NO₂의 후처리 시스템을 통합시킬 경우 보다 높은 분해효율이 기대된다.

2. 본 론

2.1 모델가스의 분해효율 실험

공간전하 및 방전패턴 측정을 통하여 적절한 방전에너지를 전달할 수 있고 가공이 용이한 XLPE와 Teflon을 유전체 재료로서 사용하기로 하였다. 분해효율 개선은 유전체장벽방전에서의 적절한 재료선정과 전압 및 주파수의 최적화에 초점을 맞추어 진행하였다. 실험에 사용한 모델가스의 경우 N₂ Base의 NOx와 O₂를 혼합하여 사용하였으며 SOx는 연소 후 처리보다는 전처리를 통한 제거가 많이 진행되고 있는 추세이어서 주로 NOx의 분해효율 개선을 주제로 실험을 하였다. 실험에 사용한 시스템의 개략도를 그림 1에 나타내었다. Mass Flow Meter를 사용하여 실제 배기ガス에서의 질소와 산소 비율에 근접하여 실험을 수행하였으며 방전 셀의 경우 다양한 유전체 재료에서의 실험이 용이하도록 평대평판 전극 구조를 채택하였다. 전극의 폭은 5cm, 길이는 20cm이며 마이크로미터가 부착된 높이조절 나사를 이용하여 간격조절을 할 수 있도록 설계하였다. 그림 2에 분해 셀의 개략도를 나타내었다.

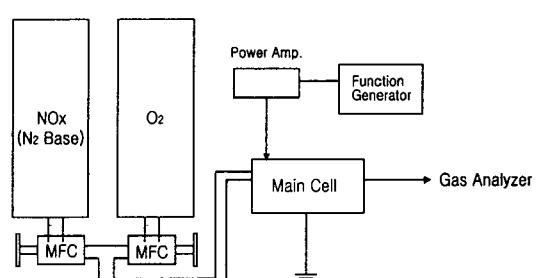


그림 1. NOx 처리 시스템의 개략도

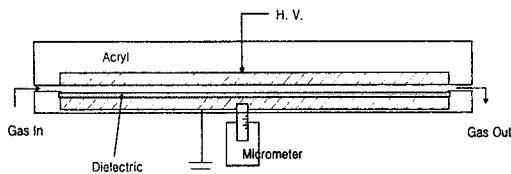


그림 2. 분해 셀의 개략도

그리고 Power Amplifier(Tek. 20/20B)를 사용하여 전압 및 주파수에 따른 분해효율을 실험을 하였다. 평판 셀에서의 가스처리 용량은 전극 사이의 간격 및 전극의 면적에 의해 결정이 되므로 분해효율은 5 liter/min의 가스속도 이하에서 측정을 하였고 가스분석기로는 TESTO 350을 사용하였다. 분해 셀의 외부는 투명 아크릴로 제작하여 방전이 Arc로 진행되지 않도록 감시가 가능하도록 하였고 전체를 밀폐형으로 하여 실현가스의 외부유출을 차단하였다. 유전체 재료는 100 μ m 두께의 XLPE를 사용하여 측정을 하였으며, 현재 같은 두께의 테프론을 사용하여 실험을 진행하고 있다. 그리고 전극간의 간격은 1mm에서 4mm까지 변화를 시켜가며 측정을 하였다. 측정결과 2mm이하의 전극간격에서는 연면방전에 의한 전류가 많이 발생하며, 3mm 이상의 전극간격에서는 주입전력의 소모가 심하여 평판형 전극에서의 간격은 2mm가 적절한 것으로 나타났다. 따라서 전극간의 간격은 2mm로 고정하여 측정을 진행하였다. 주입가스의 flow rate는 1 liter/min에서 5 liter/min까지 변화시키며 측정을 하였다. 소모전력은 100W 이하로 설계하여 향후 전원장치 제작에 있어 소모전력으로 설계를 할 수 있도록 측정을 진행하였다. 그림 3, 4, 5, 6에 전압 및 주파수 조건에 따른 NO의 분해효율을 나타내었으며 그래프가 끊어진 지점이 소모전력이 100W 이상이 되는 것으로 이 이후의 측정은 이루어지지 않았다. 인가전압은 1kV에서부터 0.1kV 단위로 증가를 시키며 측정을 하였으며 주파수는 500 Hz에서부터 100Hz 단위로 증가를 시키며 분해효율을 측정하였다. 3kV이하에서의 전압에서는 주파수를 증가시켜도 전혀 반응을 나타내지 않고 있으며 실제로 3.3kV이상에서 반응을 나타내었다. 이는 1.6kV/mm 이상의 전계를 나타내며 전극간의 간격이 좁을수록 임계전계는 낮아지나 연면방전에 의해 과다전류가 흘러 실재로 적용할 수 있는 전압과 주파수 조건에는 한계가 있었다.

2.2 인가 전압에 따른 분해효율

2.2.1 3.5kV에서의 주파수에 따른 분해효율

그림에서 알 수 있듯이 7kHz이사의 주파수에서는 over current에 의한 트립(trip)이 발생하여 더 이상의 측정이 이루어지지 않았으며 4kHz 이상의 주파수에서 NO의 분해가 나타나기 시작하여 7kHz에서 NO의 경우 60%, 전체 NOx의 경우 약 40%의 분해효율을 나타내었다. 선형근사를 적용하여 이후의 분해효율을 모의하였을 경우 전체적으로 60%까지의 분해가 가능한 것으로 나타났다.

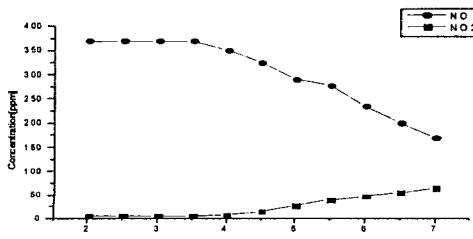


그림3. 인가전압 3.5kV에서의 주파수에 따른 NOx 분해효율

2.2.2 3.8kV에서의 주파수에 따른 분해효율

인가전압이 3.8kV에서의 분해효율을 3.5kV에서의 결과와 비교해 볼 때 낮은 주파수 조건에서 분해가 시작되기 시작하였다. 이는 실제로 전계는 0.15kV/mm의 증가가 있었으나 주파수 이득은 이보다 훨씬 높게 나타나는 것으로 적정전압 조건에 가까워질수록 주파수 가속이 더욱 용이해진다는 것을 알 수 있다. 인가전압 3.8kV에서도 역시 5.5kHz에서의 current trip이 발생하여 더 이상의 측정이 이루어지지 않았으며 이때의 분해효율은 NO의 경우 70%, 전체 NOx의 경우 약 55%의 분해효율이 나타났다. 이 역시 선형근사를 통하여 계산할 경우 150W 이상의 전력이 주입될 경우 전제적으로 75% 이상의 분해효율을 기대할 수 있게 된다.

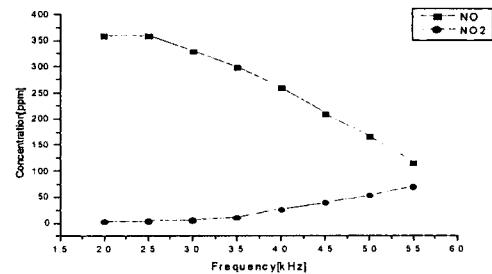


그림4. 인가전압 3.8kV에서의 주파수에 따른 NOx분해효율

2.2.3 4.2kV에서의 주파수에 따른 분해효율

4.2kV가 초과하는 전압에서는 연면방전에 의한 전류가 과다하게 발생하였으며 5kV 이상의 전압에서는 절연파괴가 일어나 더 이상의 실험이 불가능하였다. 실제로 상용주파수위 경우 3kV/mm에서 절연파괴가 일어나지만 현재 주파수 가속에 의한 결과로 약 2.4 kV/mm의 전계에서 발생하였고 따라서 유전체장벽방전의 경우 전계 조건은 2kV/mm 내외로 결정하는 것이 적절한 것으로 나타났다. 이 때도 역시 4kHz에서의 current trip이 발생하였고 이 때의 분해효율은 NO의 경우 86%, NOx의 경우 약 80%의 분해효율을 나타내었다. 그래프에서 알 수 있듯이 적정전압 조건에 가까워질수록 주파수 가속에 의한 분해가 급격하게 일어나고 있고 이는 주입전력을 조금만 향상시켜도 높은 분해효율을 기대할 수 있다는 것을 나타낸다.

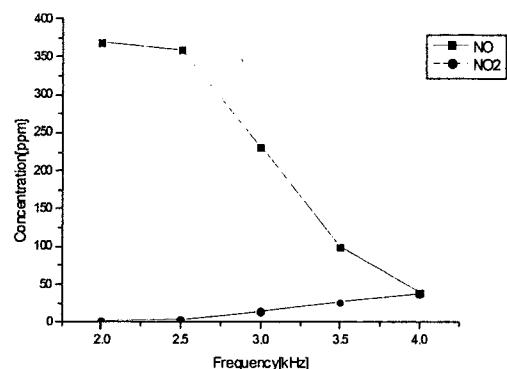


그림5. 인가전압이 4.2kV에서의 주파수에 따른 NOx분해효율

2.2.4 분해효율 비교

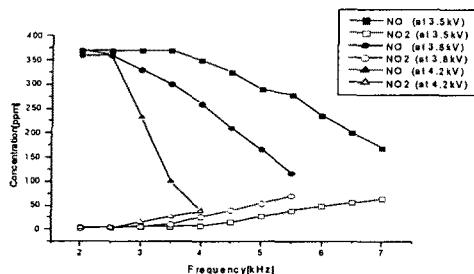


그림6. 전압 및 주파수에 따른 NOx 분해효율

그림6에 전압 및 주파수에 따른 NO의 분해효율을 나타내었다. 적정전계에 가까워질수록 주파수 가속에 의한 분해효율이 높아지는 것을 볼 수 있으며 분해 시작 후의 주파수 가속 효과 역시 빨라지는 것을 알 수 있다. 이는 전원장치의 제작시 주파수 특성을 고정시켜 보다 간단한 전원장치의 처리만으로도 NOx의 분해가 효율적으로 이루어지는 것을 볼 수 있으며 NO₂의 후처리 시스템을 통합시킬 경우 보다 높은 분해효율이 기대된다.

3. 결 론

본 연구의 목적은 유전체장벽방전 특성의 체계적인 연구를 통해 유해물질에 대한 분해효율의 향상 방안의 도출과 이를 기반으로 최적의 자동차용 공해제거 반응셀의 설계 및 제작에 있다. 따라서 본 연구에서 개발 및 축적된 저변 기술은 향후 본 연구의 궁극적인 목표인 실제 자동차에 직접 적용시켜 실용화시킬 수 있는 경제적이고 안정한 자동차 배기오염 제거장치를 제작하는데 바로 활용될 수 있으리라 생각된다. 그러나 이를 위해서는 고주파전원부의 설계 및 제작, 최적유전체의 선택, 경년에 따른 오손방지책, 최적첨가제 및 촉매의 선택 등과 함께 기존 엔진과의 적합성 등 기술적으로 해결해야 할 많은 문제가 있다.

(참고 문헌)

- [1] William H. McCulla "THE NEED FOR MIXED WASTE TREATMENT OPTIONS WITHIN THE US DEPARTMENT OF ENERGY"
- [2] H. R. Paur "REMOVAL OF VOLATILE HYDROCARBONS FROM INDUSTRIAL OFF-GAS"
- [3] I. Gallimberti "MODELING OF PLASMA CATALYTIC REDUCTION OF NO_x AND SO₂ IN FLUE GASES"
- [4] M. Yousfi, A. Poinsignon, and A. Hamani "ELECTRON DATA BASE NEEDED FOR DISCHARGE MODELING IN FLUE GAS TREATMENT"
- [5] Bernie M. Penetrante Shirley E. Schultheis "Non-Thermal Plasma Techniques for Pollution Control"