

펄스 전원 응용 코로나 방전 기반의 복합악취 저감 시스템

안재범, 정승재, 강운수, 홍석진, 류홍제
 중앙대학교

Composite odor reduction system based on corona discharge using pulsed power supply

Jae-Beom Ahn, Seung-Jae Jeong, Yun-Soo Gang, Suk-Jin Hong, Hong-Je Ryoo
 Chung-Ang University

ABSTRACT

본 논문은 펄스 전원을 응용한 코로나 방전 기반의 가스처리 시스템 내용을 다룬다. 코로나 방전 반응은 온실가스 배출 없이 복합악취 등을 저감할 수 있는 저온 플라즈마 가스 처리 방법이다. 반도체 스위치 기반의 펄스 전원과 리액터로 구성된 가스처리 시스템은 리액터의 양극과 음극에 수십 kV의 펄스 형태의 고전압을 인가하여 코로나 방전 반응을 발생시키고, 가스들의 분해 반응을 유도한다. 반도체 스위치 기반 펄스 전원은 반영구적인 수명과 빠른 펄스 상승시간 등의 장점이 있으며, 최대 40kV, 300A, 최대 반복율 3kHz, 최소 폭 1.5us 사양의 펄스 전원이 개발 및 적용되었다. 리액터는 Pin to plate type으로 해리에너지를 높일 수 있는 스트리머 코로나 방전을 이용하며, 균일한 방전 체적 및 체류 시간을 극대화시킬 수 있는 다공 다침판 구조가 적용되었다. 개발된 시스템을 이용하여 메틸메르캅탄, 황화수소 복합 악취에 대한 처리 실험이 수행되었으며, 가스 종류 및 유량, 그리고 펄스 인가 전압에 따른 저감실험 결과를 제시한다.

합 반응이 유도될 수 있다. 따라서 추가적인 풀다운 회로를 통해 Falling 기울기를 키워 리액터에 인가되는 펄스폭을 줄임으로써 재결합 반응을 억제시킬 수 있다.^[3]

본 논문에서는 반도체 스위치 기반의 펄스 전원장치와 가스 처리용 코로나 방전 리액터를 포함한 복합악취 저감 시스템을 다룬다. 펄스 전원은 커패시터 충전기와 스토리지 커패시터 48개, 그리고 1200 V 정격의 방전 스위치 48개로 구성되며, 각 방전 스위치는 하나의 스토리지 커패시터 전압을 부담하는 모듈라 셀 직렬 스택킹 구조로 개발되어, 신뢰성을 갖는 최대 40 kV 출력이 가능하다. 또한 코로나 방전 리액터는 Pin to Plate type의 반응 장치로 개발되었으며, 스트리머 코로나 방전을 이용하며 균일한 방전 체적 및 체류 시간을 극대화시킬 수 있는 구조로 설계된다. 펄스 전원 및 코로나 리액터 응용 펄스 출력 실험 결과와 가스 저감 실험 결과를 제시한다.

논문의 순서로 복합악취 저감 시스템을 소개하고, 반도체 스위치 기반의 펄스 전원과 가스 처리용 리액터를 소개한다. 리액터 연계 펄스 출력 실험 결과와 메틸메르캅탄과 황화수소의 인가 전압 및 유량별 저감 실험 결과를 제시한다.

1. 서론

코로나 방전이란 고전압에 의한 전기장이 주변의 공기 분자를 이온화시키는 현상을 의미하며, 저온플라즈마 상태를 유도할 수 있다. 저온플라즈마 상태는 대기 중 높은 운동에너지를 갖는 전자를 이용하여 공기중 질소와 산소를 해리하고, 이 과정에서 생성된 활성종은 배출가스를 분해할 수 있어 산업용 가스나 복합악취(NOx, VOCs)를 처리하는 응용 분야에 활용될 수 있다.^{[1]-[2]}

코로나 방전 및 저온 플라즈마 상태를 유도하기 위한 방법으로 Pin-to-Plate type의 리액터와 고전압 펄스 전원을 응용한 시스템이 활용될 수 있다. 저온플라즈마에 의한 화학 반응은 인가하는 전압의 시간이 짧고, rising time과 falling time이 짧을수록 환원반응을 억제시킬 수 있는데, 고전압 펄스 전원은 DC 전원에 비해 환원 재결합 반응을 억제시킬 수 있다.

따라서 코로나 방전 리액터를 구동하기 위한 반도체 스위치 기반의 펄스 전원장치가 연구중에 있다. 반도체 스위치 기반의 펄스 전원장치는 펄스의 제어가 용이하며, 반복율을 수 kHz 이상 높일 수 있고, 스위치의 수명이 반영구적으로 길다는 장점이 있다. 한편 코로나 리액터는 커패시터 특성을 갖기 때문에, 고전압 인가 후의 Falling 기울기가 낮아 분해된 가스의 재결

2. 시스템 소개

펄스 전원과 코로나 리액터를 응용한 복합악취 저감 시스템은 그림 1과 같다. 펄스 전원장치는 코로나 리액터의 Pin에는 출력 전압, Plate에는 GND 전위가 결선되어 양극에 최대 40 kV의 펄스 전압을 인가하고, 이를 통해 Pin과 Plate 사이에 스트리머 코로나 방전이 발생된다.

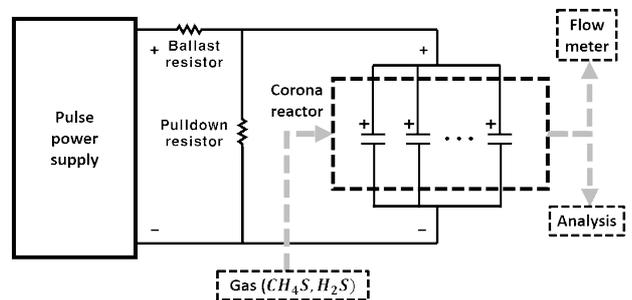


그림 1 펄스 전원 응용 복합악취 저감 시스템
 Fig. 1 Composite odor reduction system with pulsed power supply and corona reactor

스트리머 영역에서의 코로나 방전은 헤리에너지가 높아 가스 처리효율이 높은 장점이 있지만, 아크 전이로 넘어갈 수 있는 단점이 있다. 따라서 아크 방전시의 펄스 전원 반도체 소자 보호를 위해 펄스 전원의 출력측에 전류 제한을 위한 저항이 구성되었다. 또한 리액터에 병렬로 풀다운 저항을 구성하여 리액터에 인가되는 전압의 펄스폭을 낮추고, 이를 통해 환원 재결합 반응을 억제시킨다. 코로나 리액터에는 황화수소, 메틸메르캅탄 등의 복합악취 가스를 유량에 따라 주입하며, 분해된 가스의 성분 분석을 통해 가스 저감율을 평가한다.

2.1 반도체 스위치 기반 펄스 전원

반도체 스위치 기반의 펄스 모듈레이터는 그림 2와 같이 개발되었다. 하단의 커패시터 충전기는 커패시터 충전기는 약 12 kW 충전 사양을 갖으며, LCC 공진 탱크를 포함한 풀브리지 인버터와 충전 변압기를 기반으로 구성된다. 충전 변압기는 2차측에 배압회로로 구성된 총 48개의 스토리지 커패시터를 병렬로 최대 833 V까지 충전한다. 상단의 펄스 방전부는 방전스위치용 IGBT 스위치 48개가 각각 한 개의 스토리지 커패시터 충전 전압만큼 부담하는 형태로 개발되었다. 각 방전 스위치는 전류 루프 기반의 동기화된 게이트 신호에 따라 동시에 턴온되며, 이를 통해 부하측에 최대 40 kV를 인가한다.

표 1은 펄스 전원장치의 사양을 나타낸다. 가스 저감율을 높이기 위해서는 스트리머 영역에서의 코로나 발생을 위한 충분한 전압과 높은 반복율이 요구된다. 적용되는 코로나 리액터의 크기는 동일한 전압 인가시 흐르는 펄스 전류가 커진다. 펄스 전원에 적용된 방전 스위치는 최대 300 A의 펄스 출력이 가능하며, 이를 통해 대형 코로나 리액터 구동 및 리액터 병렬 구동이 가능하다. 펄스 반복율은 최대 3 kHz까지 가능하며, 충전기 파워 12 kW 범위에서 펄스 전압, 펄스 반복율, 그리고 펄스폭 가변이 가능하다.

코로나 리액터 구동시 부하측 아크에 대한 보호 로직이 요구된다. 개발된 펄스 전원 내부에 부하측에 흐르는 펄스 전류를 센싱하는 CT가 삽입되어 있으며, 이를 통해 아크 상황으로 검출시 보호 로직 회로를 통해 펄스 반복율을 낮추고 펄스 전압을 낮추도록 동작된다. 또한 아크 발생이 지속될 경우 펄스 출력을 멈추는 Latch 로직이 적용되어 신뢰성 있는 리액터 구동이 가능하다.

2.2 코로나 방전 리액터

코로나 방전 리액터는 다침 다공판 구조의 Pin to plate type으로 개발되었다. 헤리에너지를 높일 수 있는 스트리머 코로나 방전을 이용하며, 균일한 방전 체적 및 체류 시간을 극대화시킬 수 있는 장점이 있다. 제작된 리액터는 코로나 방전이 극 주위로 플라즈마를 형성하는 특성을 이용하여 다침 다공판을 구조를 통해 높은 가스 처리 효율을 달성한다. 또한 유입되는 가스의 균일한 방전 체적 및 residence time을 극대화 하는 형태로 설계되었다.

리액터는 다침 다공판 구조를 병렬로 여러 단 구성함으로써 가스 처리 효율을 증대할 수 있다. 단수가 증가할수록 동일 전압 인가시 흐르는 전류가 증가하고, 아크 전이가 발생하는 전압이 낮아진다. 따라서 에너지 대비 효율 및 아크 전이를 고려하여 6단 병렬 리액터 구조로 제작되었으며, 최대 25 CMM (Cubic Meter Minute) 가스처리 용량을 갖는다.



그림 2 개발된 40 kV 펄스 전원
Fig. 2 Developed 40 kV Pulsed power supply

표 1 펄스 전원장치 개발사양
Table 1 Specification of 40 kV pulsed power supply

Input Voltage	380 VAC
Pulse Output Voltage	0 - 40 kV
Pulse Output Current	0 - 300 A
Maximum Average Power	12 kW
Maximum Peak Power	12 MW
Maximum Repetition Rate	3 kHz
Pulse width	1.5 - 4 μs



그림 3 펄스 전원 응용 복합악취 저감 시스템 구축사진
Fig. 3 Picture of composite odor reduction system

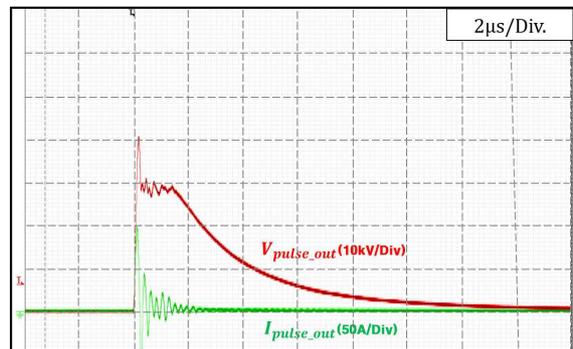


그림 4 리액터 연계 펄스 방전 실험 파형
Fig. 4 Waveform of pulse output under reactor load

3. 실험 결과

40 kV 펄스 전원과 코로나 리액터 구동 및 가스 처리 실험이 수행되었다. 그림 3은 펄스 전원 응용 복합악취 저감 시스템 구축 환경을 나타내며, 풀다운 저항으로는 1 kΩ, 1 kW 사양의 권선저항을 8개 직렬로 구성하였다. 3.1절에서 펄스 출력 실험 결과를 제시하고 3.2절에서 복합악취 저감 실험 결과를 제시한다.

3.1 펄스 전원 및 리액터 연계 실험 결과

그림 4는 펄스 전원을 이용하여 코로나 리액터의 양극에 30 kV를 인가한 실험 파형을 나타낸다. 커패시터 부하 특성상 rising이 빠르며, 40 kV 피크전압 및 30 kV로 약 1.5 μs 유지 후 풀다운 되는 파형을 나타낸다. 펄스 전류는 펄스 전원의 방전부 측에서 측정되었으며, 펄스 인가시 최대 100 A 흐르며, 풀다운 동작시에는 리액터에 병렬로 연결된 저항을 통해 흐른다. 풀다운 저항은 약 8 kΩ으로 반치전폭 약 3 μs의 펄스폭이 인가된다.

3.2 복합 악취 저감 결과

펄스 반복율은 약 300 Hz 조건에서 메틸메르캅탄(CH4S)과 황화수소(H2S) 가스를 대상으로 코로나 방전을 통한 저감 실험이 수행되었다. 그림 5는 두 종류의 가스에 대한 인가 전압 및 유량에 따른 가스 저감율을 그래프로 나타낸다. 유량은 5 CMM 과 10 CMM 조건에서 수행되었으며, 초기농도인 10 PPM(Parts Per Million) 대비 저감률을 나타낸 실험결과이다.

메틸메르캅탄은 10 CMM 유량에서 24 kV 이상 인가시 100 % 저감되며, 황화수소는 10 CMM 유량에서 32 kV이상 인가시 100% 저감되는 결과를 확인하였다.

5. 결론

본 논문은 산업 복합악취 저감을 위한 친환경적 방법으로 펄스 전원을 응용한 코로나 방전 기반의 처리 시스템을 다룬다. 반도체 스위치 기반의 40 kV 펄스 전원이 개발 적용되었으며, 다칩 다공판 구조의 6단 대용량 코로나 리액터가 제작되었다. 펄스 전원과 리액터 연계 시험이 수행되었으며, 메틸메르캅탄, 황화 수소의 유량별 인가전압에 따른 가스 저감 실험이 수행되었다. 각각 10 CMM 기준 24 kV, 32 kV 이상 인가시 생성되는 플라즈마에 의해 100% 처리 되는 효과를 검증하였다. 향후 테스트베드 현장에 적용되어 100 CMM 급 대용량 가스처리 저감 실험을 진행할 계획이다.

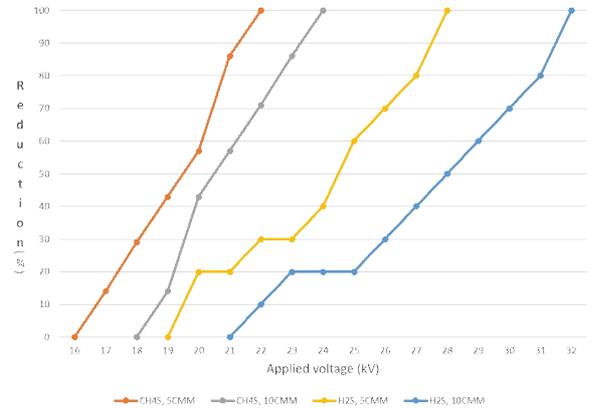


그림 5 인가전압 및 유량에 따른 가스 저감율 그래프
Fig. 5 Graph of the reduction of odor according to applied voltage

본 논문은 산업통상자원부(MOTIE)의 산업연계형저탄소공정전환핵심기술개발사업을 통해 지원을 받아 수행된 연구입니다. (No.RS-2022-00144020)

참 고 문 헌

- [1] L. Weng et al., "Experimental study and application analysis of pulsed corona discharge plasma technology for odor control," 2021 Power System and Green Energy Conference (PSGEC), Shanghai, China, 2021, pp. 257-261
- [2] Namihira et al., "Improvement of NO/sub X/ removal efficiency using short-width pulsed power," IEEE Trans. Plasma Sci., vol. 28, no. 2, pp. 434-442, April 2000
- [3] S. -H. Song, H. -B. Jo and H. -J. Ryoo, "Study on the High-Voltage Solid-State Pulsed-Power Modulator for Parallel Reactor Operation," IEEE Trans. Plasma Sci., vol. 47, no. 10, pp. 4495-4499, Oct. 2019