

소형 오존발생장치의 전력제어와 냉각효과에 관한 연구

우성훈* · 박승조* · 윤성윤** · 박지호*** · 우정인†

*동아대학교 환경공학과 · **경남발전연구원 · ***동명대학 메카트로닉스과 · 동아대학교 전기공학과

(2005년 11월 30일 접수, 2006년 1월 24일 채택)

A Study on Cooling Effect and Power Control of a Mini Ozonizer

Sung-Hoon Woo* · Seung-Cho Park* · Sung-Yoon Yoon** · Jee-Ho Park*** · Jung-In Woo†

*Department of Environmental Engineering, Dong-A University · **GyeongNam Development Institute

***Department of Mechatronics, Tongmyong College · Department of Electrical Engineering, Dong-A University

ABSTRACT : In this paper, a control method of a mini ozone generator is proposed, and also a cooling technique is described which is cooling down the flowing air gap into a silent discharger to 2°C to generate ozone of high density and diffusing power. As the digital control system for this method, a double feedback loop is designed which detects the voltage and current of equivalent capacitor of the discharger and compensates for the poor power waveform caused by the noise at high discharging frequency. During the plant modeling of this system, computing time factor is considered as a unique parameter of the power system to improve the transient responses with regard to fluctuating load and to replenish the computing time delay of the controller. Through the experiment, sinusoidal input current for discharger can be acquired and all the effectiveness of this accurate control system over unstable ozone discharger are proved.

Key Words : Cooling Technique, Silent Discharger, Double Feedback Loop, Sinusoidal Input Current

요약 : 본 논문은 미세 오존 출력을 얻을 수 있는 자동제어형 오존발생장치의 제어기법을 제시하고, 또한 무성방전에 의한 오존발생장치의 유입공기를 공극에서 저온인 2°C까지 냉각 하여 포화 확산도가 높은 고밀도 탈취용 오존을 발생시킬 수 있는 기법을 제시한다. 고주파수의 오존방전 노이즈에 의한 전원파형의 불량화를 보상하기 위해서 디지털 제한 제어시스템을 구성하고, 방전관의 등가 커패시터의 전압과 전류를 검출하여 2중의 제어루프를 설계한다. 부하변동에 따르는 과도상태 응답특성을 개선하고 제어기의 연산 지연시간을 보상하기 위하여 연산시간을 전원장치 플랜트의 고유한 파라미터로 가정하여 플랜트모델에 포함시켜 모델링한다. 제안된 오존 발생기는 고농도 고효율의 오존방전 시스템의 입력전원에서 고주파방전노이즈가 제거되어 정현적으로 되며 2배 이상의 안정된 오존출력을 얻는 것을 실험적으로 입증한다.

주제어 : 냉각기법, 무성방전, 2중 피드백 루프, 정현 입력전류

1. 서론

오존은 강한 산화력이 있으며 반응 후 즉시 산소로 환원되는 정화용 산화제이므로 환경문제의 근본적 해결을 위한 관점에서 최근 그 활용에 관한 연구가 확대 되고 있다.^{1~3)} 상하수도의 살균 및 오폐수의 정화, 탈취 등에 쓰이고 있는 염소계의 살균제에 비해 약 7배로 살균력이 높고 처리 후에 기화하여 산소로 환원하는 오존을 응용하여 급속살균과 탈취 등에 관해서 많은 연구가 진행되고 있다. 그러나 오존은 생산 전력비가 높은 것이 단점이므로 발생 시스템의 최적제어에 의한 적정투여가 될 수 있는 오존 발생장치의 개발이 요구되고 있다. 특히 국소 밀폐 공간에서 부패성 악취를 제거하는 경우에는 순시 가변농도의 제어출력을 얻을 수 있는 정밀 자동제어형 오존발생장치가 요구된다. 오존방전기의 효율

을 높이는 방법은 공극의 단축, 다극-다층 유전체를 가지는 무성방전법, 방전전극 및 공극가스의 냉각에 의한 방법 등이 있다. 또한 무성방전의 극간 전력을 증강시키는 방법이 있으나, 이는 공극전력 밀도의 증가에 의한 여기입자의 밀도증가에 의해 오히려 방전효율이 저하될 수 있다.^{4~8)}

본 논문은 내열파이버스유리를 유전체로 채용한 2극-1궤형의 무성방전형 오존발생장치에서 미량 탈취용 고농도 오존을 정밀, 시변출력으로 제어할 수 있는 페루프의 디지털 전력제어시스템을 개발하고자 하였다. 오존발생용 수 kV, 수십 kHz의 고압 고주파수 방전은 공극의 에너지축적에 의한 불안정 방전전류와 고주파수의 방전노이즈를 발생하여 전원측 입력전원에 포함되므로 이를 차단시켜 양질의 전원을 유지해야 하며, 또한 고주파수의 스위칭인버터의 시변비선형 요소와 등가콘덴서로 구성되어 있는 방전부하의 상태파라미터들의 변동에 대한 페 루프제어가 가능한 시스템이 될 수 있어야 한다. 본 논문은 포화 확산도가 높은 고밀도오존을 시변출력 할 수 있고 방전전류를 안정화 할 수 있는 오존발생기를

† Corresponding author
E-mail: jiwoo@dau.ac.kr
Tel: 051-200-7734

Fax: 051-200-7734

설계하기 위해서, 방전기의 고압극을 저온인 2℃로 냉각하고, 방전시스템을 단상 컨버터-인버터 전원에서 LC 필터의 커패시터전압과 전류의 2중 폐 루프제어계로 구성한다.⁹⁻¹¹⁾ 본 연구에서 제안되는 디지털 제어기는 연산지연시간을 전원장치 플랜트의 고유한 파라미터로 가정하여 플랜트모델에 포함시킴으로서 과도응답 특성을 개선하고, 내부 전류 제어 루프는 파라미터 변동에 강한 내부모델 제어를 제안하여 플랜트의 출력이 지령치와 정확히 일치하는 2차 데드비트 응답을 갖도록 설계한다. 또한 방전공극에너지의 축적과 같은 외란에 대한 민감성을 제거하기 위해서 부하전류 예측 기법을 내부의 전류제어루프에 부가하여 피드포워드 보상하고, 정상상태에서 영 오차의 단상전원을 얻기 위해서 외부의 전압제어루프를 구성하며, 공진주파수를 정현파 지령치로 설정하여 동일한 극점을 가지게 함으로서 공진 주파수에서 무한대의 이득을 얻게 한다. 결과적으로 방전 커패시터 전류는 예측제어 연산시간으로 설정된 2 샘플링 내에서 오버슈트나 정상상태 오차 없이 지령치와 정확히 일치하도록 제어되며, 20 kHz를 중심으로 하는 방전고주파 노이즈가 전원측에서 제거되어 양질의 단상정현파 전원에 의해 미세조질이 될 수 있는 안정된 오존발생시스템을 설계하고자 하였다.

2. 실험재료 및 방법

2.1. 방전관 구조 및 오존발생 시스템

원통형 무성방전관의 구성도를 Fig. 1에 나타내었다. 고주파수 20 kHz, 고전압 2 kV의 PWM 패턴전원 H.F.Source가 방전관의 내전극 P_{inner} 와 외전극 P_{outer} 간에 가해지며, 원통형 내열강화유리(pyrex glass)로써 두께 1.0 mm인 유전체의 내경은 4.0 mm이고, 내극과 유전체 사이의 공극은 0.4 mm이다. 외전극 P_{outer} 은 관의 외측표면에서 두께 0.2 mm, 길이 25 mm인 원통형 규석동이고 원통형 유전체표면에 밀착되어 있다. 내전극 P_{inner} 은 직경 0.25 mm의 STS 316 스텐전이 유전체 유리관 내부에서 공극 0.4 mm를 두고 길이 25 mm로서 U자형으로 설치되어 있다. 냉각 장치는 220 V, 30 W의 밀폐형 냉각기로서 직경 56 mm, 길이 50 mm의 원통형탱크(Cooling tank)를 최외각에 설치하여 냉각 기류를 회전시키는 구조이다.

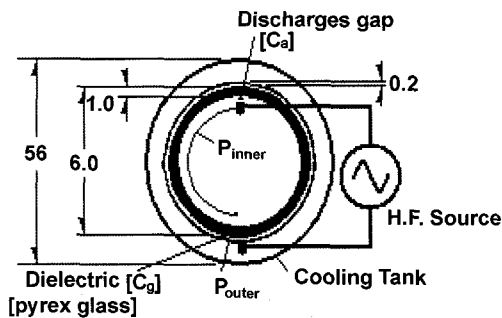


Fig. 1. Ozone generation tube(side section, unit : mm).

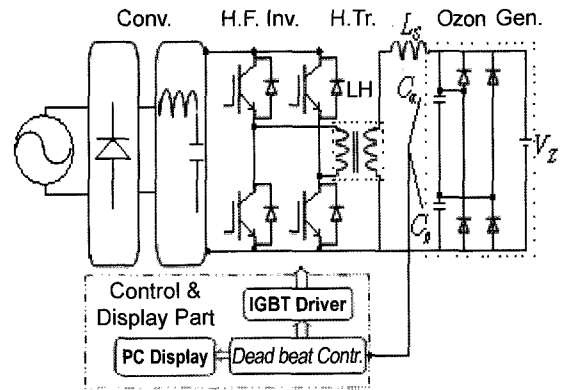


Fig. 2. Block diagram of silent discharges type ozonizer system.

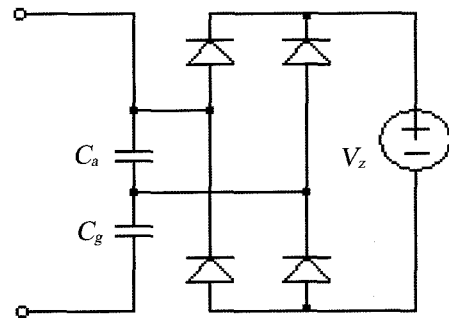


Fig. 3. Equivalent circuit of ozone generation tube.

상용 단상전원으로부터 컨버터-인버터-고압트랜스-유전체 방전관으로 구성된 무성방전형 오존발생 시스템을 Fig. 2에 나타내었다. 방전전압과 전류를 검출하여 20 kHz의 스위칭 인버터에 인가함으로써 2중 폐루프 제어계를 구성하여 방전 고주파를 제거하고 정상상태 오차가 영으로 되는 안정된 방전 시스템을 얻고자 하였다. 또한 냉각 챔에 의해 냉각방전된 오존출력은 음식물발효조 등의 악취를 제거하는 시스템으로 구성되어 있다.

2.2. 등가회로 및 시스템 모델링

무성방전형 오존 발생장치는 고압트랜스의 인덕턴스 L_H 와 공극용량 C_a 및 유전체용량 C_g 가 직렬로 접속되어 있는 용량성 부하회로이고 이들의 파라미터변동에 의해서 방전상태가 결정되며, 또한 공극과 유전체에 축적되는 에너지 중에서 방전 유지전압 V_z 에 의해서 방전이 지속 된다. 따라서 Fig. 3과 같은 등가회로가 구성된다.

출력측 LC 필터와 고압트랜스를 포함한 무성방전형 오존발생기의 등가회로는 Fig. 4와 같으며, 다음과 같은 상태방정식을 얻을 수 있다.

$$L \frac{di_i}{dt} + Ri_i = v_i - v_C = v_L \quad (1)$$

$$C \frac{dv_C}{dt} = i_i - i_L \quad (2)$$

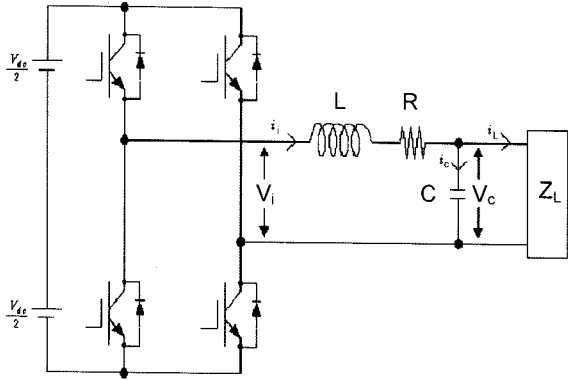


Fig. 4. Equivalent circuit of silent discharges type ozonizer.

$$i_i = i_C + i_L \tag{3}$$

$$v_C = Z_L i_L \tag{4}$$

여기서, L 및 R 은 전원장치 출력측 필터의 인덕턴스와 고압 트랜스 인덕턴스의 직렬 등가인덕턴스 및 등가저항이며, C 는 방전극간의 유전체의 C_g 와 공극 C_o 의 직렬 등가커패시턴스를 나타낸다. 또한, v_i 와 i_i 는 각각 전원장치의 출력전압과 전류이고, v_C 와 i_C 는 각각 출력측 필터와 방전유전체 및 공극에 걸리는 등가전압과 전류를 나타낸다. 그리고 v_L 은 출력측 필터를 포함한 고압트랜스의 등가 인덕턴스전압강하이고, i_L 은 외란으로 작용하는 부하전류를 각각 나타내며, Z_L 은 오존발생 공극에 축적되는 잔류에너지전류에 의한 외란을 나타낸다.

모든 상태변수의 초기치를 0이라고 가정하고 식 (1)부터 식 (4)를 라플라스 변환하면 식 (5)에서 식 (8)과 같다.

$$(Ls + R) I_i(s) = V_i(s) - V_C(s) = V_L(s) \tag{5}$$

$$Cs V_C(s) = I_i(s) - I_L(s) \tag{6}$$

$$I_i(s) = I_C(s) + I_L(s) \tag{7}$$

$$V_C(s) = Z_L(s) I_L(s) \tag{8}$$

이 식들로부터 Fig. 4의 방전시스템 플랜트에 대한 블록선도는 Fig. 5와 같이 얻을 수 있다.

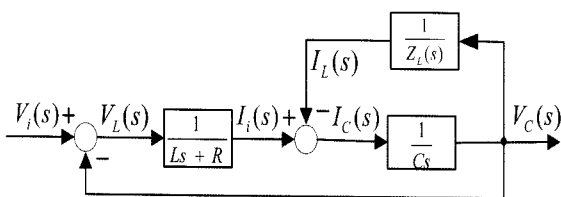


Fig. 5. Plant block diagram of discharging system.

2.3. 오존발생장치용 전원장치의 디지털 제어기

2.3.1. 내부 전류 제어기

Fig. 4로부터 전원장치 출력전류는 식 (9)와 같다.

$$I_i(s) = G_{pc}(s) [V_i(s) - V_C(s)] \tag{9}$$

여기서, 플랜트전달함수는 $G_{pc}(s) = \frac{1}{Ls + R}$ 이다.

식 (9)로부터 공칭 플랜트모델의 전달함수 $\tilde{G}_{pc}(s)$ 는 식 (10)과 같이 정의되며 디지털제어기의 연산지연시간을 전원장치 플랜트의 고유한 파라미터로 가정하여 플랜트모델에 포함시켜 ZOH(Zero Order Hold) 등가모델로 변환하여 모델링하면 식 (11)이 얻어진다.

$$\tilde{G}_{pc}(s) = \frac{1}{Ls + R} \tag{10}$$

$$G_{pc}(z) = \frac{b}{z - a} \tag{11}$$

여기서, $a = e^{-RT_{sc}/L}$, $b = \frac{1}{R}(1 - a)$, 그리고 T_{sc} 는 내부 전류 제어루프의 샘플링 주기이다.

동일한 방법으로 식 (10)의 공칭 플랜트모델의 전달함수를 ZOH(Zero Order Hold) 등가모델로 변환하면 식 (12)와 같이 된다.

$$\tilde{G}_{pc}(z) = \frac{\tilde{b}}{z - \tilde{a}} \tag{12}$$

여기서, $\tilde{a} = e^{-\bar{R}T_{sc}/\bar{L}}$, $\tilde{b} = \frac{1}{\bar{R}}(1 - \tilde{a})$ 따라서, 디지털 제

어기의 연산지연시간을 플랜트의 고유한 파라미터로 가정하여 z^{-1} 로 플랜트모델에 포함시키고, 전원장치 출력전류에 외란으로 동작하는 출력전압을 피드포워드 보상으로 제거한다면 식 (11)과 식 (12)로부터 내부전류제어루프의 블록선도는 Fig. 6과 같이 된다.

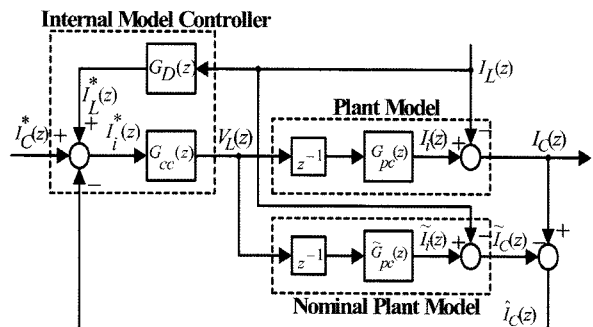


Fig. 6. Block diagram of inner current control loop.

여기서, $I_L(z) = 0$ 로서 외란이 존재하지 않는다면 $I_C(z)$ 는 $I(z)$ 와 동일하게 된다. 또한, 실제 플랜트출력 $I_C(z)$ 와 공칭모델의 출력 $\tilde{I}_C(z)$ 의 오차는 피드백 신호 $\hat{I}_C(z)$ 를 결정한다. 피드백 신호 $\tilde{I}_C(z)$ 와 전류 지령치 $I_C^*(z)$ 의 오차는 내부모델 제어기로 입력된다. 만약, 실제 플랜트와 플랜트의 공칭 모델이 정확히 일치한다면 피드백 신호 $\hat{I}_C(z)$ 은 0이 된다. 따라서, 내부의 전류제어루프는 개루프 시스템으로 동작하고 파라미터 불확실성은 존재하지 않게 된다.

Fig. 6으로부터 연산지연시간을 포함한 내부전류제어루프의 폐루프전달함수는 식 (13)과 같이 된다.

$$\left[\frac{I_C(z)}{I_C^*(z)} \right]_{I_L(z)=0} = \frac{G_{cc}(z)z^{-1}G_{pc}(z)}{1 + G_{cc}(z)z^{-1}[G_{pc}(z) - \tilde{G}_{pc}(z)]} \quad (13)$$

실제 플랜트와 공칭 모델이 정확히 일치한다고 가정하여 $G_{pc}(z) = \tilde{G}_{pc}(z)$ 이면, 0의 정상상태 오차를 얻기 위해서 식 (13)은 식 (14)와 같이 되고, 이때 내부모델 제어기 $G_{cc}(z)$ 의 조건은 식 (15)와 같이 된다.

$$\left[\frac{I_C(z)}{I_C^*(z)} \right]_{I_L(z)=0} = G_{cc}(z)z^{-1}\tilde{G}_{pc}(z) = 1 \quad (14)$$

$$G_{cc}(z) = \frac{1}{z^{-1}\tilde{G}_{pc}(z)} = \frac{z(z - \tilde{a})}{\tilde{b}} \quad (15)$$

식 (15)의 내부모델 제어기는 연산지연시간 때문에 0의 정상상태 오차를 얻을 수 없으므로 내부모델 제어기 $G_{cc}(z)$ 는 식 (16)과 같이 플랜트출력이 설정된 제어연산시간 2 샘플링 내에서 지령치와 일치하는 2차 데드비트응답을 갖도록 설계한다.

$$G_{cc}(z) = \frac{1}{z^2} \frac{1}{z^{-1}\tilde{G}_{pc}(z)} = \frac{(z - \tilde{a})}{bz} \quad (16)$$

식 (16)의 조건 하에서 연산지연시간을 포함한 식 (13)의 폐루프 전달함수는 식 (17)과 같이 된다.

$$\left[\frac{I_C(z)}{I_C^*(z)} \right]_{I_L(z)=0} = \frac{1}{z^2} \quad (17)$$

식 (17)로부터 커패시터 전류 $I_C(z)$ 는 설정된 2 샘플링 시간 안에 오버슈트나 정상상태 오차없이 지령치 $I_C^*(z)$ 와 정확히 일치하도록 제어된다. 또한, 디지털제어기의 연산지연시간을 플랜트모델에 포함시켰으므로 연산지연시간을 위한 추가적인 보상은 필요없게 된다.

식 (17)의 폐루프전달함수의 주파수 응답은 식 (18)과 같

이 1의 이득과 $2\omega T_{sc}$ 의 위상지연을 가진다.

$$\left[\frac{I_C(e^{j\omega T_{sc}})}{I_C^*(e^{j\omega T_{sc}})} \right]_{I_L(e^{j\omega T_{sc}})=0} = e^{-2j\omega T_{sc}} \quad (18)$$

외란이 존재한다면, 즉 $I_L(z) \neq 0$ 인 경우 필터커패시터 전류는 전원장차 출력전류와 부하전류의 차이가 되며, 내부 전류제어루프는 식 (17)과 같은 2차 데드비트응답을 얻을 수 없다. 부하외란을 보상하기 위해서는 주기적인 부하전류의 특성을 고려하여 부하전류 예측기법으로 이러한 부하외란을 보상한다.

2차 데드비트응답을 갖는 식 (17)에서 부하전류를 고려하면 커패시터 전류는 식 (19)와 같이 되고, 커패시터전류가 2차 데드비트응답을 만족하기 위한 조건은 식 (20)과 같다.

$$I_C(z) = (I_C^*(z) + I_L^*(z))z^{-2} - I_L(z) \quad (19)$$

$$I_L^*(z) = z^2 I_L(z) \quad (20)$$

그러나, 식 (20)의 $I_L^*(z)$ 는 실제 부하전류 $I_L(z)$ 보다 예측 제어연산으로 설정된 2 샘플링 이전의 값이어야 하며, 부하전류가 주기적이면 $I_L(z)$ 의 값은 식 (21)과 같이 부하전류 예측기법에 의해서 현재 샘플링값과 이전의 샘플링값으로부터 구해지고, 전달함수 $G_D(z)$ 는 식 (22)와 같이 된다.

$$i_L(k+2) \approx 3i_L(k) - 2i_L(k-1) \quad (21)$$

$$G_D(z) = \frac{3z - 2}{z} \quad (22)$$

따라서, 식 (21)의 부하전류 예측기법에 의해서 외란은 완전히 보상된다. 즉, 외란이 존재하는 경우에도 전류제어루프는 식 (17)의 2차 데드비트응답을 만족하며, 오존발생기의 전원측 필터 커패시터전류는 제어연산시간 2 샘플링 내에 오버슈트나 정상상태 오차없이 지령치와 정확히 일치하도록 제어된다.

2.3.2. 외부 전압 제어기

부하전류 예측기법에 의해서 외란이 완전히 보상된다면 내부의 전류제어루프는 2차 데드비트제어기로 등가화 될 수 있다. 따라서, 외부의 전압제어루프의 블록선도는 Fig. 7과 같다.

Fig. 7로부터 전압제어루프의 플랜트전달함수는 식 (23)과 같다.

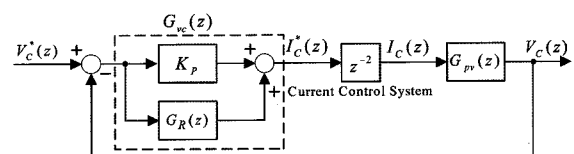


Fig. 7. Block diagram of outer voltage control loop.

$$G_{pv}(z) = \frac{T_{sv}}{C(z-1)} \quad (23)$$

여기서, T_{sv} 는 외부의 전압제어루프의 샘플링주기이다.

Fig. 7에서 제안한 전압제어기는 비례제어기와 공진제어기를 병렬로 연결한 비례-공진제어기로 교류성분에 대하여 기존의 PI 제어기와 유사한 함수의 형태이다. 여기서 공진 제어기는 정현파 지령치와 동일한 극점을 가지며, 제안하는 공진제어기의 전달함수는 다음과 같다.

$$G_R(s) = \frac{k_r(\cos\theta_r\omega_r s - \sin\theta_r\omega_r^2)}{s^2 + \omega_r^2} \quad (24)$$

여기서, k_r 과 w_r 은 각각 공진제어기의 제어이득과 공진 주파수이며, θ_r 은 공진주파수에서 공진제어기의 위상이다.

식 (24)에서 $s=jw_r$ 로 두면, 공진주파수에서 식 (25)와 같이 무한대 이득을 가진다.

$$G_R(s)|_{s=j\omega_r} = \infty \quad (25)$$

본 논문에서는 공진제어기의 공진주파수를 출력전압 지령치의 기본주파수로 설정함으로써 정상상태에서 전압제어 루프는 크기와 위상에서 영 오차를 나타낸다.

한편 식 (24)에서 유한한 선택도(Quality Factor) Q 를 가지는 공진제어기의 전달함수는 식 (26)과 같이 된다.

$$G_R'(s) = \frac{k_r(\cos\theta_r\omega_r s - \sin\theta_r\omega_r^2)}{s^2 + \omega_r s / Q + \omega_r^2} \quad (26)$$

식 (26)에서 공진주파수 $s=jw_r$ 이면 식 (27)과 같은 공진 제어기의 특성을 얻을 수 있다.

$$G_R'(s)|_{s=j\omega_r} = k_r Q(\cos\theta_r + j\sin\theta_r) \quad (27)$$

θ_r 은 공진주파수 w_r 에서 공진제어기의 위상이며, 식 (24)의 공진제어기는 선택도 Q 가 무한대인 특수한 경우이다.

식 (18)의 내부의 전류제어루프에서 위상지연은 지령치와 실제전류 사이에 발생하는 위상오차가 되고 이를 보상하기 위해서 제안된 비례-공진제어기의 위상 θ_r 의 값을 내부전류 제어루프와 반대 위상으로 설정한다. 또한, 공진제어기와 병렬로 비례제어기를 삽입함으로써 매우 빠른 과도응답을 얻을 수 있으며, 가능한 한 비례 이득은 커야한다.

식 (24)의 공진제어기를 z 변환하면 전압제어루프의 전체 폐루프전달함수는 식 (28)과 같다.

$$\frac{V_C(z)}{V_C^*(z)} = \frac{\{G_R(z) + K_P\} G_{cc}(z) G_{pv}(z)}{1 + \{G_R(z) + K_P\} G_{cc}(z) G_{pv}(z)} \quad (28)$$

식 (28)의 폐루프전달함수는 $z = e^{j\omega_r T_{sv}}$ 로 두면 식 (29)와 같이 된다.

$$\frac{V_C(z)}{V_C^*(z)} \Big|_{z=e^{j\omega_r T_{sv}}} = 1 \quad (29)$$

식 (29)에서 제안한 전압 제어루프는 지령치와 출력이 일치하며, 정상상태 오차가 영이 됨을 알 수 있다.

3. 결과 및 고찰

제안한 시스템의 타당성을 검토하기 위해서 220 V, 10 W 무성방전형 오존발생기에 30 W 소형 냉각장치를 부착하고, 컨버터-인버터 시스템에 DSP(TMS320C32)를 이용하여 2중 폐루프의 제어기를 적용하여 실험을 하였다.

실험에 사용된 전원장치 시스템의 파라미터는 Table 1과 같다.

오존발생 방전부는 2℃로부터 20℃까지 냉각하고, 또한 20℃에서 45℃까지 연속 실험하여 각각의 온도변화에 대한 방전상태와 소비전력을 고찰하였다.

Table 1. System parameter for simulation

DC Link Voltage	200 [V]
Output Voltage	220 [V](RMS), 60 [Hz]
Switching Frequency	20 [kHz]
Nominal Filter Inductance	1.2 [mH]
Nominal Filter ESR	0.7 [Ω]
Nominal Filter Capacitance	10 [μ F]

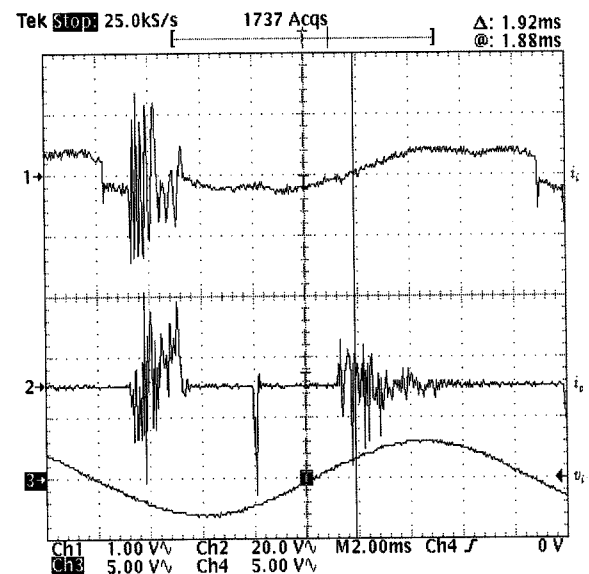


Fig. 8. Experimental result of the input source and output current wave form for ozonizer.

Fig. 8은 Fig. 2 및 Fig. 4의 오존발생시스템에서 기존의 직렬 공진형 인버터를 개루프로 구동하고 전원측 입력전류 i_i 및 입력전압 v_i 의 파형과 방전전류 i_c 의 실측파형을 나타낸다. 파형 1은 60 Hz 전원트랜스를 루프로 하는 의사구형 파전류 i_i 의 파형이고 방전여기기간 1.2 ms와 20 kHz의 방전 고조파 전류가 1.7 mA p-p(probe배율 1 mA/v)의 진폭으로 포함되어 있다. 파형 2는 20 kHz, 6 mA p-p(0.5 mA/v) 진폭의 방전기 단자 전류 i_c 의 파형을 나타내며 전원측 전류에서 포함되는 고조파와 동위상이다. 전원측 전압의 영점에서 1.2 ms의 공극 여기전압에 도달되어 방전이 개시되고 있다. 파형 3은 전원트랜스의 정현파 출력전압을 나타내고, 입력트랜스에 의해 지연된 전원측 입력 전류에 대해 1.92 ms 위상차를 나타내고 있다.

Fig. 9는 제안된 2중 페루프제어에 의해서 개선된 전원측 파형과 저온 2°C로 오존 방전기를 냉각제어하였을 때의 방전전류에 대한 실험 결과를 나타낸다. 파형 1의 전원측 전류 i_i 의 파형은 Fig. 8의 기존의 전류 i_i 의 파형 2에 비교하여 전원에 포함되어 있던 20 kHz 노이즈는 완전히 제거되어 파형은 거의 정현적으로 개선되었고, 여기서 파형의 바탕이 구형이 되고 있는 것은 입력측의 트랜스를 루프로 하는 전류이기 때문이다. 위상은 데드비트 예측 정제에 의해 1.7 ms가 단축되어 거의 동위상의 전류로 되었다. 파형 2는 방전전류 i_c 의 파형이고 방전피크가 12 mA p-p로서 Fig. 8의 상온 방전 때의 i_c 에 비해서 2배 이상으로 방전피크가 증가했고 여기구간은 720 us로 단축되었으며, 방전구간 또한 0.6 ms가 증가하고 있으므로 Fig. 8의 파형 2의 방전상태에 비해 약 2배의 에너지적인 증가를 보이고 있다. 파형 3은 60 Hz의 전원측 전압의 파형이며, Fig. 8의 파형 3과 비교하여 전압고조파 노이즈는 완전히 제거되었다. 결과적으로 제안된 전압 전류의 2중 페루프 제어기법과 방전관 냉각에 의해서 등가 L 및 C에서 안정화된 직렬공진전압과 전류는

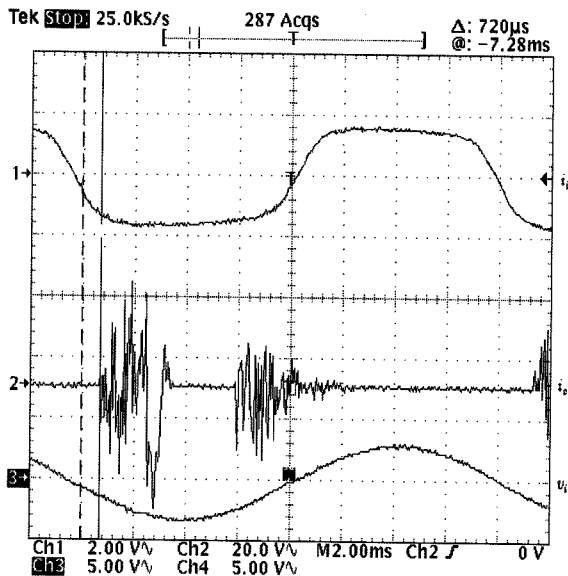


Fig. 9. Experimental result of the input source and output current wave form for proposed ozonizer.

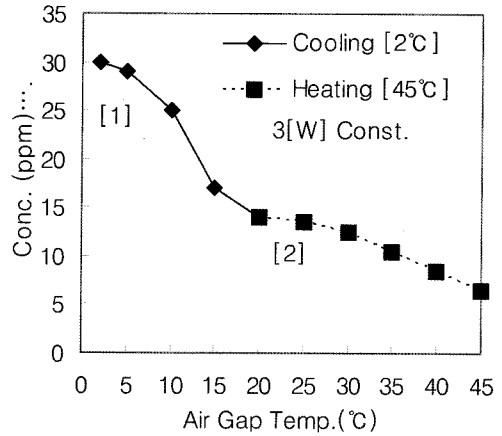


Fig. 10. Ozone concentration curve for cooling gas of discharging air gap.

충·방전 에너지를 증대시키고 냉각에 의해서 방전전류의 피크가 증가되며, 방전폭은 30% 증가됨으로서 방전 유효에너지를 약 2배로 증가 시키고 있다.

Fig. 10은 2°C의 저온으로 냉각된 오존방전기에서 제어전력을 3 W 일정으로 하고, 공극온도를 2°C로부터 45°C까지 가변하여 방전온도에 따른 오존 출력의 농도를 배기농도 ppm으로 측정된 것이다. 그림에서 곡선 [1]의 부분은 공극온도가 2°C로부터 20°C까지 가변 되었을 때의 오존 출력 특성이며 2°C에서 최대출력 농도는 30 ppm이고 15°C에서 출력이 17 ppm으로 급감하고 있으며, 이는 방전극의 온도가 상온으로 상승하여 양극 앞의 음이온이 축적되기 시작한 것으로 볼 수 있다. 곡선 [2]는 20°C부터 45°C까지의 오존출력 특성이며 35°C 이후는 방전이 불안정한 것을 보이고 있으며, 이는 방전극의 실온도가 60°C 이상으로 추정되는 방전극의 과열에 의해서 전력선 방출이 비선형적으로 산란되어 미세 방전용 소형전극 앞에서 음이온 축적밀도가 포화밴드를 이루었기 때문으로 판단된다. 여기서 오존방전기의 입력은 공기 2 L/min이고 출력오존의 농도측정은 Thermo Environmental Instruments Inc.의 O₃ Analyzer Model 49c에 의해 측정했으며 농도검출은 0.5 m³의 챔버내에서 ppm 단위로 측정했다.

Fig. 11은 방전기 소비전력에 따른 출력오존의 농도특성이다. 곡선 [1]은 공극온도를 상온 20°C로 고정하고 최소방전전력 1.5 W에서 최대 5 W까지 전력을 가변제어 해가며 출력오존농도를 측정된 것이다. 소비전력 1.5 W에서 5 ppm의 불안정 방전이 시작되고 2 W까지 12 ppm의 농도로서 비교적 선형증가를 보이고 있고, 2 W 이후 5 W까지는 방전극의 과열에 의해 불안정 방전에 따른 포화출력을 보이고 있다.

곡선 [2]는 오존 방전극을 2°C의 저온으로 냉각하고 있는 상태에서 제안된 제어기에 의해서 방전전력을 1 W에서 5 W까지 증가시킬 경우의 오존의 출력농도를 측정하고 있다. 방전초기의 1 W, 2°C에서 10 ppm의 오존이 출력되며, 5 W 전력에서 30 ppm의 오존출력을 보이고 있다. 페루프 제어된 오존발생기의 특성곡선 [2]는 기존의 직렬공진형 인버

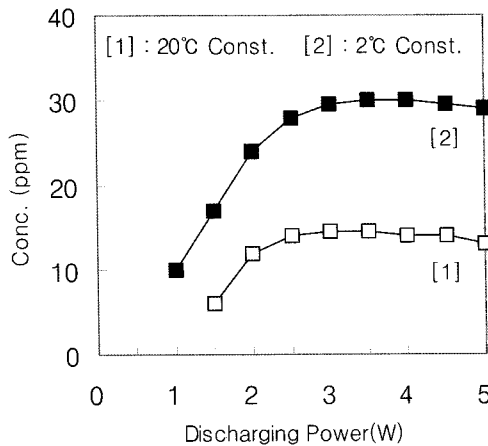


Fig. 11. Ozone concentration curve for discharging power.

터에 의한 상온곡선 [1]의 2 W, 12 ppm에 비해서 2배 이상의 고농도의 안정된 출력을 얻고 있으며, 결과적으로 제안된 제어시스템은 2.5 W의 일정전력과 공극온도 2~20°C 영역을 유지 시키게 되므로 Fig. 9와 같은 안정된 방전전류와 Fig. 10의 방전출력특성으로 부터 2배 이상의 선형적 출력이 안정적으로 증가되고 있는 것을 볼 수 있다.

4. 결론

본 논문은 각종 방전기의 전원 불량화대책을 보상하기 위해서 실내용의 소형 오존발생기를 채택하여 단상컨버터-인버터 전원시스템에서 디지털 데드비트 제어로 구동하였으며, 전원에 포함되는 고주파수의 방전노이즈가 약 70 %로 제거되었고, 방전기의 전원측을 양질의 정현파 전원으로 보상시킨 것이다. 제안된 디지털제어기는 연산지연시간을 전원장치 플랜트의 고유한 파라미터로 가정하고, 플랜트모델에 포함시켜 모델링함으로써 시스템은 정상상태 및 과도상태에서 부하 조건에 관계없이 연산지연시간이 보상되어 외란에 강인하고 매우 빠른 과도응답특성을 얻음으로서 출력오존의 농도를 고정도의 순시출력으로 제어할 수 있었으며, 2차 데드비트 응답을 갖는 내부모델 전류제어기와 비례-공진 전압제어기를 가지는 2중 폐루프제어에 의해서 위상 또한 크게 보상되었다. 또한 소형 냉각장치를 추가함으로써 오존출력을 2배 이상 증대시켰다. 따라서 2°C로 냉각되고 저 전력 정밀제어 량으로 얻어지는 고농도의 안정된 오존출력은 악취가스에 급속 확산되어 배오존율을 높임으로서 탈취 등의 시변 부하에서 효율이 증대되고 전력비를 감소시킬 수 있을 것이다.

사 사

본 논문은 2001년도 동아대학교 학술연구비(공모과제)의 지원에 의하여 수행된 연구 결과입니다. 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 강태희, 오병수, 권순범, 손병용, 강준원, "오존의 정수처리 적용을 위한 오존소비인자에 관한 연구," 대한환경공학회지, **27**(6), 633~669(2005).
2. 정재우, 이현돈, 이용환, 전기일, 김형갑, 조무현, "무선방전 공정의 오존 발생 특성에 관한 연구," 대한환경공학회지, **26**(3), 305~312(2004).
3. Takeo, N. T. and Hirofumi, A. G., "Pulse-density modulation of a high-frequency voltage-source inverter," *IEEE Trans. IA*, **125**, 413~419(2005).
4. Lim, H. C., Kim, J. K., and Woo, S. H., "Trial manufacture of a ozone generator using silent discharge type and improvement Properties of the water quality in the lake," *Trans. KIEE*, **50**(p), 125~129(2001).
5. Lee, S. K., Chun, B. J., Park, Y. K., Park, W. Z., Lee, K. S., Kwon, H. H., Song, H. J., and Park, J. H., "A study on the supply gas temperature characteristics of silent discharge type ozonizer by applying radio frequency voltage," *Trans. KIEE*, **15**(5), 46~54(2001).
6. Junya Suehiro., Masahiro Takahashi., Yuya Nishi., Weidong Ding., Kiminobu Imasaka., and Masanori Hara., "Improvement of the ozone generation efficiency by silent discharge at cryogenic temperature," *IEEE Trans. FM*, **124**, 791~796(2004).
7. Shengpei Wang., Masaki Ishibashi., Yuelu Feng., and Mutsuo Nakaoka., "Series-compensated inductor type resonant inverter using pulse density modulation scheme for efficient ozonizer," *IEEE*, **7803**, 19~23(1997).
8. Song, H. J., Lee, K. S., Park, W. Z., Lee, D. H., Kim, G. Y., and Kim, L. K., "Trial manufacture and characteristics of a multi-discharge type ozonizer," *Trans. KIEE*, **48**(c), 533~541(1999).
9. Ito, Y. and Kawauchi, S., "Microprocessor-based robust digital control for UPS with three-phase PWM inverter," *IEEE Trans. Power Electronics*, **10**(2), 196~204(1995).
10. Kukrer, O., "Deadbeat control of a three-phase inverter with an output LC filter," *IEEE Trans. Power Electronics*, **11**(1), 16~23(1996).
11. Kukrer, O., "Discrete-time current control of voltage-fed three-phase PWM inverters," *IEEE Trans. Power Electronics*, **11**(2), 260~269(1996).