

논문 2008-45SC-5-7

플라즈마 발생용 전원장치의 LCD 패널 세정효과에 관한 연구

(A Study of LCD Panel Cleaning Effect of Plasma Generation Power Source)

김 규 식*

(Gyu-Sik Kim)

요 약

UV 램프 시스템은 오랫동안 TFT LCD 나 PDP 의 패널 세정에 사용되어 왔으나, 저렴한 가격의 고성능 세정에 대한 필요성 때문에 고전압 플라즈마 세정에 대한 기술이 개발되고 그 성능이 향상되어 왔다. 장벽방전 (barrier discharge) 혹은 무성방전 (silent discharge) 으로 불리는 유전체 장벽 방전 (Dielectric-Barrier Discharges, DBDs) 는 오존 발생기에 주로 이용되어 왔다. 본 논문에서는 LCD 세정용으로 6kW 급 고전압 플라즈마 발생장치를 구현하였다. 3상 입력전압을 직류로 정류한 뒤, 인버터 시스템에 의해 고주파 펄스로 바꾸고 고압 트랜스퍼머를 거쳐 다이오드로 정류한다. 마지막으로, 고압 플라즈마를 발생시키기 위해 양방향 고전압 펄스 스위칭회로가 사용되었다. 실험을 통해 상압 플라즈마가 LCD 패널 세정에 크게 유용함을 보였다.

Abstract

UV lamp systems have been used for cleaning of display panels of TFT LCD or Plasma Display Panel (PDP). However, the needs for high efficient cleaning and low cost made high voltage plasma cleaning techniques to be developed and to be improved. Dielectric-Barrier Discharges (DBDs), also referred to as barrier discharges or silent discharges have been exclusively related to ozone generation for a long time. In this paper, a 6kW high voltage plasma power supply system was developed for LCD cleaning. The 3-phase input voltage is rectified and then inverter system is used to make a high frequency pulse train, which is rectified after passing through a high-power transformer. Finally, bi-directional high voltage pulse switching circuits are used to generate the high voltage plasma. Some experimental results showed the usefulness of atmospheric plasma for LCD panel cleaning.

Keywords : LCD Panel, Plasma, Cleaning, DBD, High-power transformer

I. 서 론

TFT LCD, PDP 등의 반도체 소자를 사용하는 공정은 다양한 종류의 대형 글래스 및 폴리머 평판을 사용하는데, 고효율 세정 및 경제성 확보가 필요함에 따라 기존의 UV 램프를 이용하는 대신에 상압 플라즈마 기

술로 대처하려는 노력이 진행되어 왔다. 상압 플라즈마 기술은 유기물, 글래스 절단시의 수분, 회로 제작시 발생하는 잔류 폴리머 등의 오염물질을 플라즈마 내의 산소 활성화종(radical)을 이용하여 제거하는 것으로 환경적으로 안전하고 효율이 높다. 플라즈마는 물질의 제 4의 상태를 의미한다. 즉 고체, 액체, 기체와 더불어 플라즈마라는 제 4의 상태를 지칭한다. 플라즈마란 하전 입자(전자와 이온)들과 중성입자(원자와 분자)들로 구성된 거시적 준 중성 상태를 뜻한다.

상압 플라즈마의 발생은 대기압하에서 다양한 방법의 전기방전을 이용하되, 전자에너지의 세기가 이온 및 중

* 정회원, 서울시립대학교 전자전기컴퓨터공학부
(Dept. of Electrical and Computer Engineering,
The University of Seoul)

※ 본 연구논문은 2007년도 서울시립대학교 교내 자유
공모과제 지원에 의하여 연구되었습니다.

접수일자: 2008년6월16일, 수정완료일: 2008년9월8일

성입자 등의 에너지보다 높게 유지되도록 한다. 플라즈마의 온도는 상온 1,000°K인데 반해 전자의 온도를 10,000°K ~ 100,000°K로 유지함으로써 다양한 플라즈마 화학반응 및 표면처리의 응용에 적합한 방전이 가능케 한다. 상압플라즈마를 구현하는 방법으로는 유전체 장벽 방전 (Dielectric-Barrier Discharge, DBD), 코로나 방전, 마이크로웨이브 방전, 아크방전 등의 기술이 있다. 이 중 수천도의 높은 온도를 수반하여 주로 스프레이 멜팅 (spray melting) 등에 사용하는 아크방전을 제외한 나머지 기술은 모두 비교적 저온에서 구현이 되므로 폴리머 분야나 전자/반도체 공정에 사용이 가능하며, 현재 널리 그 가능성이 타진되거나 이미 적용되고 있다. 이 중 유전체 장벽 방전은 기존의 진공플라즈마에 비해 100 ~ 1000배 이상 높은 반응 활성종의 농도를 구현할 수 있으면서도 온도가 상온 150°C정도로 낮아서 폴리머, 글래스 및 저 용점 금속의 표면처리에 적합하다.

한편, 본 논문과 관련된 기존 연구로는, 펄스발생기와 플라즈마로 구동되는 촉매 반응기를 이용하여 담배연기 같은 실내공기 오염물질 제거용 고효율 공기세정 시스템이 개발된 사례가 있다^[1]. 또한, 대기중으로부터 NH₃, H₂S, C₇H₈ 을 제거하기 위해 유전체 장벽 방전이나 펄스 코로나 방전 (PCD) 을 이용한 경우도 있었는데 실험을 통해 펄스 코로나 방전이 유전체 장벽 방전보다 성능이 우수함을 보여 주었다^[2]. 형광 가스 방전 (Fluorinated gas discharges)이 반도체 공장에서 에칭이나 챔버 세정용으로 널리 사용되고 있으나, NF₃/Ar, CF₄/O₂/Ar, C₂F₆/O₂/Ar 챔버 세정용 플라즈마의 전기적 특성을 분석한 결과 이들 방전의 성능이 매우 불규칙적으로 예측이 어렵다는 연구 결과도 있었다^[3]. 60Hz 교류 전원을 이용한 토치타입 발생기로 상압 N₂ 플라즈마를 실현한 연구도 있었다^[4]. 한편, 리모트 플라즈마 시스템의 구조에 대한 연구와 400kHz의 스위칭 주파수를 갖는 하프 브리지 인버터 타입의 리모트 플라즈마 전원 장치에 관한 연구도 있었다^[5].

본 논문에서는 LCD 세정용으로 6kW 급 고전압 플라즈마 발생장치를 구현하였다. 3상 입력전압을 직류로 정류한 뒤, 인버터 시스템에 의해 고주파 펄스로 바뀌고 고압 트랜스퍼머를 거쳐 다이오드로 정류한다. 마지막으로, 고압 플라즈마를 발생시키기 위해 양방향 고전압 펄스 스위칭회로가 사용되었다. 실험을 통해 상압 플라즈마가 LCD 패널 세정에 크게 유용함을 보였다.

II. DBD 의 무성방전 전력특성

그림 1에 나타난 전체방전면적이 S 인 전극의 구성에 대하여 등가회로를 생각한다. 유전체두께를 d_g 라 하고 공극두께를 d_a 라 한다. 유전체유전율을 ε_gε_o 이고 공극유전율을 ε_o 라 하면 단위면적당 유전체의 정전용량 C_g 와 단위면적당 공극의 정전용량 C_a 는 다음과 같다.

$$C_g = \epsilon_g \epsilon_o / d_g \tag{1}$$

$$C_a = \epsilon_o / d_a \tag{2}$$

공간방전이 일어나지 않고 있을 때의 등가회로는 C_g S 와 C_aS 가 직렬 접속되어 있는 것으로 모델링될 수 있기 때문에 전극간의 정전용량을 C 라 하면 다음과 같다.

$$C = C_a C_g S / (C_g + C_a) \tag{3}$$

방전시는 공간이 전기적으로 임피던스가 0인 쇼트상태로 간주되므로, 방전시 전극간의 정전용량 C' 은 다음과 같다.

$$C' = C_g S \tag{4}$$

한편, 구형파 전류원에 의한 무성방전의 경우에 대해 알아보면 각주파수가 ω 인 구형파전류가 그림 1에 있는 양전극간을 흐를 때의 유기전압과 방전전력의 파형이 그림 2에 있다. 유기전압 V 는 비방전영역 (0 < θ < θ') 에서는

$$V = -V_m + \frac{I_d}{\omega C} \theta \tag{5}$$

로 되고, 방전영역 (θ' < θ < π) 에서는 다음과 같다.

$$V = V_m - \frac{I_d}{\omega C'} (\pi - \theta) \tag{6}$$

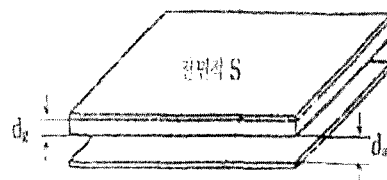


그림 1. 무성방전전극
Fig. 1. Silent discharge electrode.

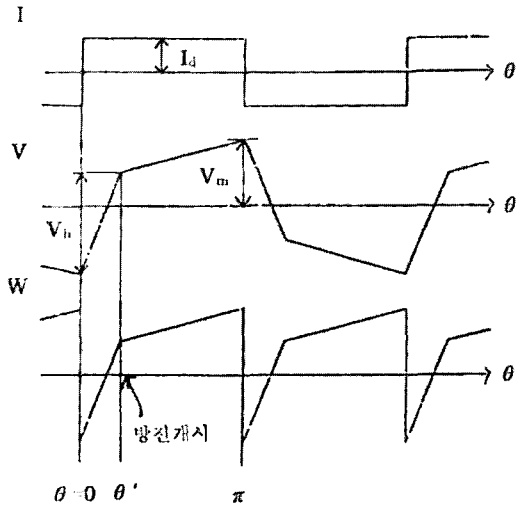


그림 2. 구형파 전류원에 의한 무성방전의 전류, 전압, 전력파형
 Fig. 2. current, voltage, and power waveforms of silent discharge for rectangular current source.

그림 2에 있어서 V_b 는 전류의 극성이 반전하여 방전이 정지한 경우의 공간전압과 전류의 극성이 반전된 상태에서 방전이 시작되는 공간전압의 전압변화이다. 이 V_b 를 이용하여 전압의 최고치 V_m 과 방전개시위상 θ' 은 다음과 같이 구해진다.

$$V_m = \frac{1}{2} \left\{ \frac{C' - C}{C'} V_b + \frac{I_d}{2fC'} \right\} \quad (7)$$

$$\theta' = \omega CV_b / I_d \quad (8)$$

한편, 방전전력 W 는 다음과 같다.

$$W = \frac{\omega}{\pi} \int_0^{\pi/\omega} V I_d dt = I_d V_b / 2 - 2f C V_m V_b \quad (9)$$

역률을 구하기 위하여 전류와 전압의 실효치 I_{eff} 와 V_{eff} 를 구해 본다.

$$I_{eff} = I_d \quad (10)$$

$$V_{eff} = \left(\frac{\omega}{\pi} \int_0^{\pi/\omega} V^2 dt \right)^{1/2} = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \left[V_m^2 \pi - \frac{V_m I_d}{\omega C'} \left\{ \frac{C'}{C} \theta'^2 + (\pi - \theta')^2 \right\} + \frac{I_d^2}{3\omega^2 C'^2} \left\{ \frac{C'^2}{C^2} \theta'^3 + (\pi - \theta')^3 \right\} \right]^{1/2} \quad (11)$$

$$\text{power factor} = W / (I_{eff} V_{eff}) \quad (12)$$

이와 같이 구한 유기전압의 최고치 V_m , 실효치전압 V_{eff} , 방전전력 W , 역률을 전류실효치 I_{eff} , 각주파수 ω , 비방전시 부하 정전용량 C 를 사용하여 다음과 같이 방전개시위상 θ' 의 함수로서 정규화시킬 수 있다.

$$\widehat{V}_m = \frac{V_m \omega C}{I_{eff}} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{C}{C'} \right) \theta' + \frac{\pi}{2} \frac{C}{C'} \quad (13)$$

$$\widehat{V}_{eff} = \frac{V_{eff} \omega C}{I_{eff}} = \left[\widehat{V}_m^2 - \frac{\widehat{V}_m}{\pi} \left\{ \theta'^2 + \frac{C}{C'} (\pi - \theta')^2 \right\} + \frac{1}{3\pi} \left\{ \theta'^3 + \frac{C^2}{C'^2} (\pi - \theta')^3 \right\} \right]^{1/2} \quad (14)$$

$$\widehat{W} = \frac{W \omega C}{I_{eff}^2} = \theta' \left(\frac{1}{2} - \frac{\widehat{V}_m}{\pi} \right) \quad (15)$$

$$\text{power factor} = \widehat{W} / \widehat{V}_{eff} \quad (16)$$

정현파전압원의 경우에 있어서 무성방전의 등가회로에 의한 전류, 전력파형은 그림 3과 같다. 구형파전류원의 경우와 유사한 유도과정을 통해, 전류의 최대치 I_m , 실효치 I_{eff} , 방전전력 W , 역률을 실효치전압

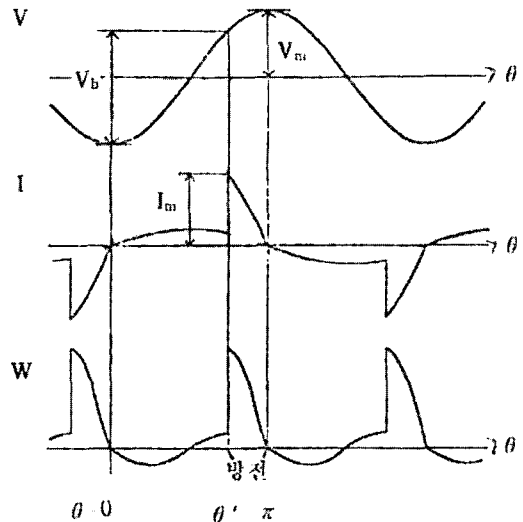


그림 3. 정현파전압원에 의한 무성방전의 전압, 전류, 전력파형
 Fig. 3. voltage, current, and power waveforms of silent discharge for sinusoidal voltage source.

V_{eff} , 각주파수 ω , 방전시의 정전용량 C' 를 써서 방전개시 위상 θ' 의 함수로 나타내면 다음과 같이 정규화될 수 있다.

$$\begin{aligned} \hat{I}_m &= \frac{I_m}{\omega C' V_{eff}} = \sqrt{2}, \quad 0 \leq \theta' < \frac{\pi}{2} \text{의 경우} \\ &= \sqrt{2} \sin \theta', \quad \frac{\pi}{2} \leq \theta' < \sin^{-1} C/C' \text{의 경우} \\ &= \sqrt{2} \leq C/C', \quad \sin^{-1} C/C' \leq \theta' \leq \pi \text{의 경우} \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \hat{I}_{eff} &= \frac{I_{eff}}{\omega C' V_{eff}} \\ &= \left[1 - \frac{1}{\pi} (\theta' - \sin \theta' \cos \theta') (1 - C^2/C'^2) \right]^{1/2} \end{aligned} \quad (18)$$

$$\hat{W} = \frac{W}{\omega C' V_{eff}^2} = \sin^2 \theta' / \pi \quad (19)$$

$$\text{power factor} = \hat{W} / \hat{I}_{eff} \quad (20)$$

III. 상압 플라즈마 LCD 세정 장치의 구현

그림 4와 같은 DBD에 사용되는 상압 플라즈마 전원장치는 그림 5에서와 같이 상압의 방전을 발생하기 위

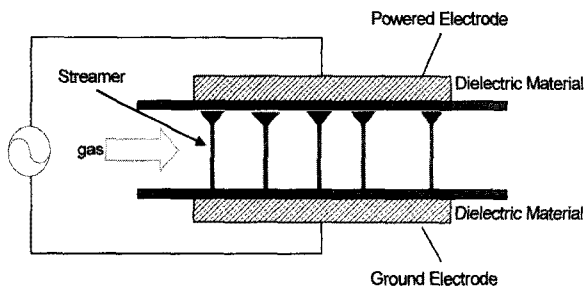


그림 4. DBD의 간단한 도식
Fig. 4. A simple schematic diagram of DBD.

한 10kV/cm 이상의 고전압 출력, 유전체의 충방전 현상에 필요한 5 μ s 이하의 짧은 전류 펄스 생성, 정밀한 출력 제어를 위한 인버터 전원기술, AC 출력을 위한 고전압 스위칭 기술, 비정상 아크발생의 감지, 소호 및 재 기동 등의 제어기술 등이 필요하다. 상압 플라즈마 기술 관련하여 최근 국내외에서도 다양한 상압 플라즈마 방전기술에 대한 연구와 개발이 이루어지고 있다. 그러나 상압 플라즈마 전원장치는 주로 1차측에서 저압 펄스 (LVPulse)를 만들어 고압 고주파 변압기를 이용하여 고압 펄스를 만든다.

이와 같은 방법은 펄스의 상승 및 하강시간 제어 및 정확한 출력제어가 어렵다. 정밀한 펄스를 만들기 위해서는 고압 고주파 변압기 2차측에 고압 펄스 스위칭회로를 추가하여 출력을 제어할 필요가 있다.

표 1과 같은 스펙을 갖는 LCD 용 상압 플라즈마 전원장치를 구현하였다. TI사의 TMS320F240을 이용하여 전기능 고속 디지털 제어를 가능케 한 cpu 및 주변회로와 DC-DC 컨버터를 통하여 필요한 전원 12가지를 생성할 수 있는 직류전원장치가 있고, 고속제어 및 양방향 펄스 출력제어를 위한 IGBT 구동회로가 각각 구현되었다. 파워 트랜스퍼머 전단에 설치하여 입력전원의 평활화 및 상압 플라즈마 전극과의 시정수 조정용으로 이용되는 리액터와 0~300V 전압을 0~20kV으로 승압

표 1. 플라즈마 전원장치의 스펙
Table 1. Specification of plasma power source.

전력용량	6 kW
입력전압	220 VAC
주파수	50, 60 Hz
출력전류	30 - 600 mA
출력 주파수	30 kHz 이하

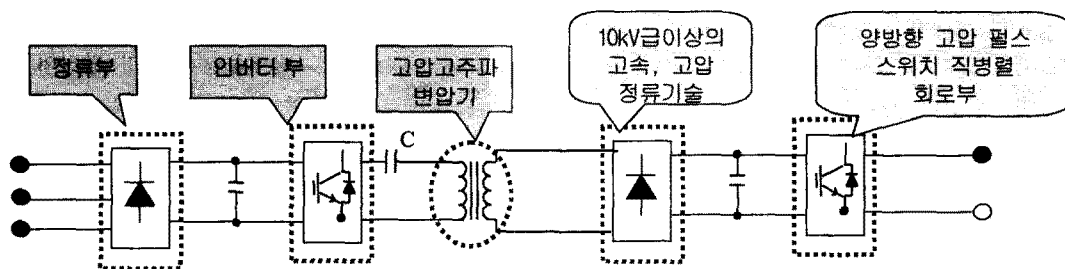
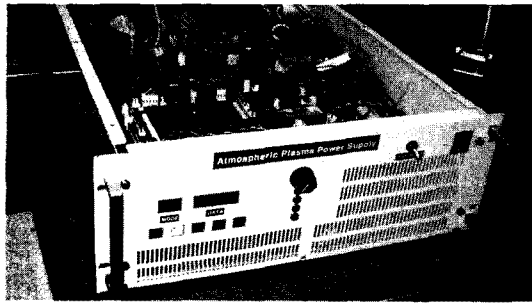
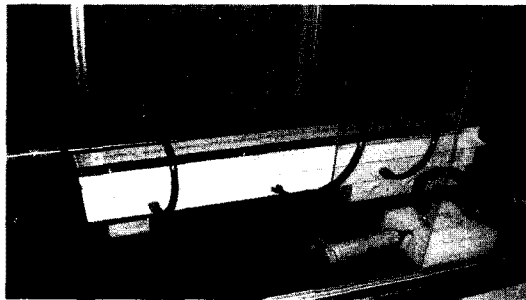


그림 5. 상압플라즈마 전원장치의 개념도
Fig. 5. Block diagram of atmospheric plasma power source.



(a) 전원장치



(b) 방전 플랜트

그림 6. LCD 패널 세정시험용 전원장치 및 방전 플랜트

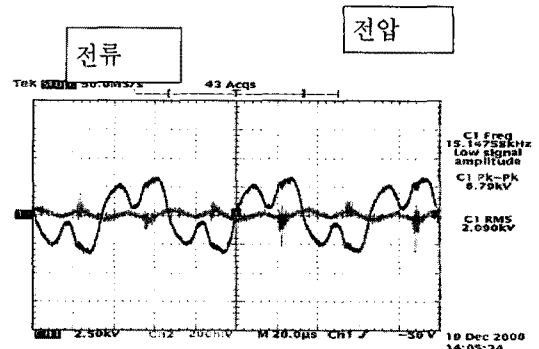
Fig. 6. Power source and discharge plant for LCD panel cleaning experiments.

시키는 파워 트랜스퍼머로 구성되어 있다. 이와 같이 구현된 LCD 세정 시험용 전원장치와 이를 이용하여 플라즈마 방전 시험할 수 있는 세라믹 방전 플랜트 모듈이 그림 6에 있다.

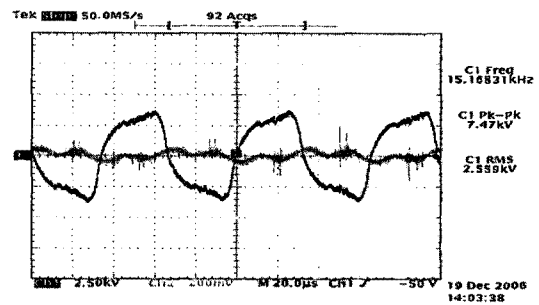
IV. 실험 및 검토

첫 번째 실험으로, 그림 7과 같이 스위칭 주파수는 15kHz로 일정하게 하고 듀티비 변화에 따른 전류 및 전압 파형을 관찰한 결과, 듀티비가 30% 정도이면 전압 파형이 구형파의 가운데 부분이 함몰하여 방전에 악영향을 주었다. 60%에 가까워지면 구형파가 아닌 정현파에 가까운 부드러운 곡선의 형태를 가진 전압파형을 만들어 내기 때문에 방전효과가 대폭 감소하였다. 듀티비가 40%에서 50% 사이의 경우가 가장 방전효과가 우수한 부분으로 판단되었다.

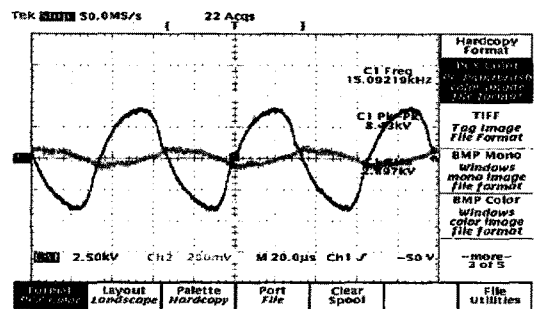
두 번째 실험으로는, 플라즈마 방전에 의한 LCD 패널의 세정효과를 간접적으로 측정하기 위한 방안으로 세정된 LCD 패널의 표면에 물방울을 한방울 떨어뜨려 얼마나 퍼지느냐에 따라 세정효과를 판단하는 접촉각 테스트를 수행하였다. 플라즈마 세정은 시료의 표면에 흡착된 원자들의 단일층(monolayer)를 제거하는 기술로



(a) 듀티비 = 30%



(b) 듀티비 = 50%



(c) 듀티비 = 60%

그림 7. 여러 가지 듀티비에 따른 방전전압 및 전류 파형

Fig. 7. Voltage (ch.1) and current (ch.2) waveforms with duty ratio changed.

정의되는데 현미경과 같은 측정기구로 세정 여부를 판단하기 어렵고 표면의 표면에너지(surface energy)를 측정하여 세정 여부를 판단한다. 시료 표면의 표면 에너지를 측정하는 가장 수월한 방법은 물방울의 접촉각을 측정하는 것이다. 그림 8은 플라즈마 방전이 되는 장면을 나타내고 그림 9는 LCD 조각판을 이 방전 플랜트 위에 서서히 움직여 나가게 하는 장면이다. 그림 9와 같이 3m/min의 이송속도로 움직여 가며 플라즈마 방전관위를 지나게 함으로써 세정을 행한 LCD 조각판에 대한 사진이 그림 10에 있다. 이 조각판들에 대한 접촉각 테스트를 하기 위하여 그림 11과 같은 장비를 이용하였다.



그림 8. 플라즈마 방전 장면
Fig. 8. Plasma discharge phenomena.

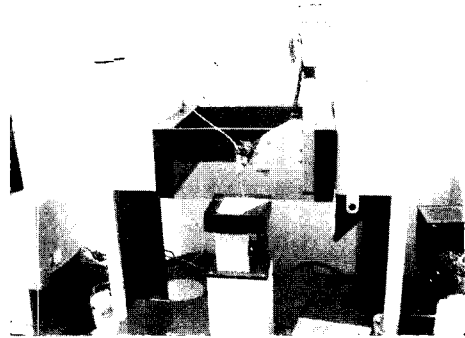


그림 11. 접촉각 테스트 장비에 의한 세정효과 측정
Fig. 11. Cleaning performance test using contact tester.

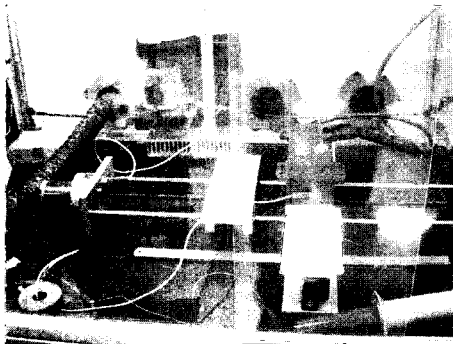


그림 9. LCD 조각판에 대한 세정실험
Fig. 9. Claning test for a piece of LCD panel.

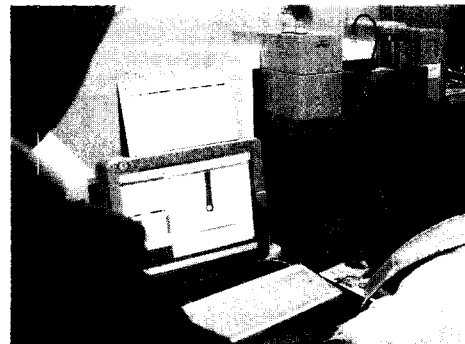


그림 12 접촉각 테스트
Fig. 12. Contact angle test.

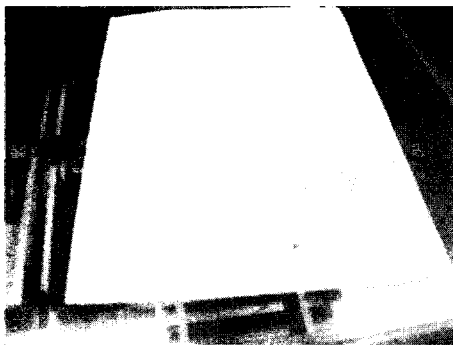


그림 10. 세정 테스트를 한 LCD 조각판들
Fig. 10. LCD panel specimen after cleaning test.

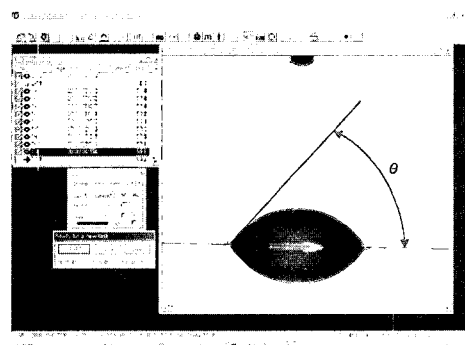


그림 13 세정전의 물방울 드롭
Fig. 13. Water drop before cleaning.

그림 12는 접촉각 테스트 장비와 소프트웨어에 의한 접촉각 측정과정을 보여준다. 세정하기 전에 물 한 방울을 떨어뜨리면 그림 13과 같이 표면 이물질에 의한 물방울 뭉침 현상이 나타나며 이때의 접촉각 θ 는 59° 를 나타냈으며, 1회 세정 후의 경우는 그림 14와 같이 10° 의 접촉각을 보였다. 또한, 2회 세정 후의 접촉각 θ 는 5° 이하였음을 확인할 수 있었다. 접촉각은 LCD 패널의 이송속도, 플라즈마 전원정치의 전력용량, 패널과 방전모듈사이의 간격등에 따라 달라지는데 이송속도가 느릴수록, 전력용량이 클수록, 간격이 작을수록 접촉각이 작아지며 세정효과가 향상된다. 실제 산업현장에서

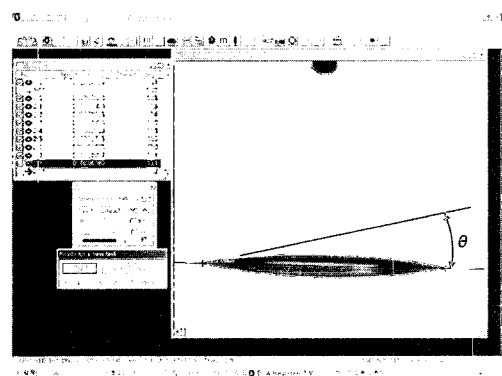


그림 14. 1회 세정 후의 물방울 드롭
Fig. 14. Water drop after the first cleaning.

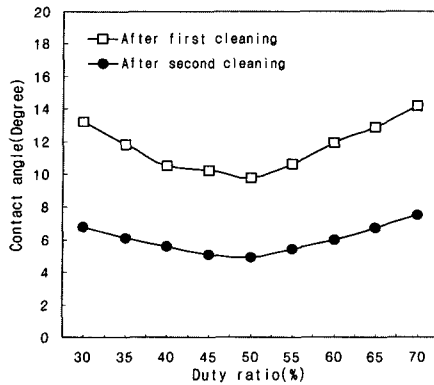


그림 15. 다양한 듀티비에 대한 접촉각 테스트
Fig. 15. Contact angle tests for varied duty ratio.

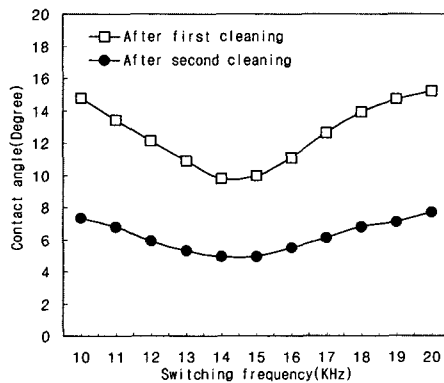


그림 16. 다양한 스위칭 주파수에 따른 접촉각 테스트
Fig. 16. Contact angle tests for varied switching frequency.

사용되려면 대체적으로 접촉각이 5° 이하가 되어야 하는 것으로 알려져 있다.

마지막 실험으로, 그림 15와 같이 듀티비가 변화했을 경우에 대한 접촉각 테스트 시험을 수행하였다. 출력전압의 피크-투-피크가 20kV 이었고 스위칭 주파수는 14kHz 이었다. 첫 번째 세정 후의 접촉각은 12° 근처이었고, 두 번째 세정 후의 접촉각은 6° 부근이었다. 듀티비가 50% 정도였을 때 가장 세정효과가 우수함을 알 수 있었다. 그림 16은 출력전압을 20kV 로, 듀티비를 50%로 각각 고정시키고 스위칭 주파수가 변화했을 경우의 접촉각 테스트 결과를 보여준다. 스위칭 주파수가 14kHz 근방에서 가장 세정효과가 우수함을 알 수 있었다. 플라즈마의 라디칼 에너지에 의해 불순물이 이온화되는 과정이 세정 효과로 나타나는 것이므로 높은 전력이 소비되면 그만큼 세정효과가 좋아진다. 듀티가 커진다는 것은 일단 전압이 크다는 것이고 전력의 증대를 의미한다. 실험결과는 어느 이상 전압(전력)이 커지면 세정효과가 감소하는 것으로 나타나고 있다. 부유 인덕

턴스와 플라즈마 부하의 커패시턴스에 의한 공진이 문제가 되어 출력전압의 파형이 그림 7처럼 구형파에서 점차 정현파 형태로 변하는 것으로 판단된다. 그림 3의 정현파 전압원보다 그림 2의 구형파가 훨씬 방전효율이 좋아 세정효과가 우수한 것으로 알려진 바 본 실험결과도 그와 같이 해석할 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 LCD용 상압 플라즈마 전원장치를 구현하였다. 6kW 급으로 20kV 이하의 Bipolar 펄스전압으로 $30 \sim 600\text{ mA}$ 의 출력전류 제한을 두었고 30kHz 의 출력주파수를 얻을 수 있도록 하였다. 실험을 통해 우수한 플라즈마 방전성능을 얻을 수 있는 듀티비와 출력주파수를 얻을 수 있었다. 또한, 세정성능을 간접적으로 알아보기 위해 접촉각 테스트를 수행하였다. 접촉각 테스트 결과, 듀티비가 50% 근처에서 출력주파수가 14kHz 근방에서 가장 세정효과가 우수함을 알 수 있었다. 이들 시험을 통해 본 연구결과가 LCD 패널 세정용으로 적합함을 간접적으로 확인할 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] Akira Mizuno et al., "Indoor Air Cleaning Using a Pulsed Discharge Plasma", *IEEE Trans. On Industry Applications*, vol.35, no.6, pp.1284-1288, 1999.
- [2] Zuo Li et al, "The Experimental Investigations of Dielectric Barrier Discharge and Pulse Corona Discharge in Air Cleaning", *Plasma Sci. Technol.*, vol.5, pp.1961-1964, 2003.
- [3] M. A. Sobolewski, J. G. Langan and B. S. Felker, "Optimization of plasma-enhanced chemical vapor deposition chamber cleaning plasmas", *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures*, vol.16, no.1, pp.173-182, 1998.
- [4] Yoon-Ho Choi, et al., "Characteristics of atmospheric pressure N_2 cold plasma torch using 60Hz AC power and its application to polymer surface modification", *Surface and Coatings Technology*, vol.193, no.1, pp.319-324, 2005.
- [5] 김수석, 원충연, 최대규, 최상돈, "리모트 플라즈마 용 전원 개발", *2002 전력전자학술대회 논문집*, pp.245-248, 2002.
- [6] 최대규, 원충연, "플라즈마 발생용 자동 정합회로",

전력전자학회지, 제7권 1호, pp.16-20, 2002.

- [7] 이정호, 최대규, 최상돈, 이병국, 원충연, 김수석,
 “반도체 Ash 공정용 PWM 제어 Plasma 발생방
 법”, 2006전력전자학술대회 논문집, pp.470-474,
 2006.

— 저 자 소 개 —



김 규 식(정회원)

1981년 서울대 공대
전자공학과 졸업

1983년 동 대학원 제어계측공학과
석사 졸업

1990년 동 대학원 제어계측공학과
박사 졸업

1988년~1992년 대우중공업 중앙연구소
선임 연구원

1993년~현재 서울시립대학교 전자전기컴퓨터
공학부 교수

2003년~2005년 Univ. of Wisconsin-Madison
방문교수(Visiting Scholar)