《연구논문》 Korean Journal of Optics and Photonics, Volume 24, Number 1, February 2013
DOI: http://dx.doi.org/10.3807/KJOP.2013.24.1.039

강화유리 표면의 친수성 특성 조사에 관한 연구

박성진† · 서진우 · 이승규

한국폴리텍대학교 대구캠퍼스 스마트전기과
㊞ 703-721 대구광역시 서구 국채보상로 43길 15

(2012년 11월 16일 받음, 2013년 2월 6일 수정본 받음, 2013년 2월 12일 게재 확정)

본 연구에서는 플라즈마 장치의 광 특성과 접촉각 특성을 조사하여 스마트폰에 사용되는 강화유리 표면의 친수성 특성을 알아보였다. 본 연구에서 공정 가스의 분압과 입력 전압의 정도에 대한 강화유리 표면의 친수화 정도를 조사하였다. 각 변수에 따라 아르곤 가스의 이온화 정도에 따라 차이가 있음을 알 수 있었다. 본 연구에서, 강화유리 표면은 처리되기 전과 비교하여 접촉각의 변화나 광방출 특성에서 나타난 것들을 토대로 친수화가 되었음을 알 수 있었다.

Study of the Hydrophilic Properties of Toughened Glass

Sung Jin Park†, Jin Woo Seo, and Seung Kyu Lee

Department of Smart Electrical Engineering, Daegu campus of KOREA Polytechnic, Daegu 703-721, Korea

(Received November 16, 2012; Revised manuscript February 6, 2012; Accepted February 12, 2013)

In this study, we assessed the hydrophilic characteristics of the surface of toughened glass used in smartphones by investigating the optical properties and contact angle characteristics of the plasma device. In this study, the characteristics were different depending on the partial pressure of the gas, input voltage, and degree of ionization of argon gas. In this study, the surface of the toughened glass became more hydrophilic, as indicated by contact angle and light spectrum, after plasma treatment than before the treatment.

Keywords: Atmospheric pressure, Plasma, Hydrophilic, Contact angle, Toughened glass
OCIS codes: (240.0240) Optics at Surfaces; (240.6680) Surface plasmons

I. 서 론

대기압 플라즈마를 이용한 표면 개질 방법은 예전에 사용되어 오던 진공상태에서의 플라즈마 발생 방법에서 대기압 상태의 저온상태로 시료를 처리할 수 있는 방법으로 연구되면서 원가절감과 공정처리 속도 향상이라는 측면에서 볼 때 산업계에서 각광받는 기술로 그 응용에 있어 많은 부분으로 확대되어 현재에는 의료분야로 까지 확대되면서 살균, 지혈, 박테리아 제거 등의 목적으로 사용되고 있다.[1, 2, 3]

본 연구에서 사용된 플라즈마 장치는 연구된 글로우방전, 코로나 방전, 유전체장벽방전, RF방전, 마이크로파 방전 등과 같은 여러 형태의 플라즈마 발생장치 중에 대기압 상태에서 RF 전원을 사용하는 방식을 적용하였다. 글로우 방전은 비교적 낮은 전압과 전류를 이용한 방전 방식으로 형광튜브에 활용되어 사용되고 있으며, 코로나 방전은 뾰족한 끝에 수 kV의 직류전압을 인가하여 절연파괴가 일어나는 것을 응용한 방식으로 현재 복사기나 집진기 등에 활용되고 있으며, 유전체장벽방전 방식은 유전체 층을 두 전극 사이에 설치하여 방전 전극간의 한 위치에서 이온화가 일어나면 운반된 전하들이 유전체에 축적되는 원리를 응용한 장치이다. RF 방전 방식은 두 전극에 인가하는 전원을 직류가 아닌 교류를 사용하는 방식으로 보통 공업용으로는 13.56 MHz를 사용하며 전극을 방전체적 외부에 둠으로써 전극의 오염을 막을 수 있다는 점과 균일한 플라즈마를 생성하기 쉽고, 대기압에서도 가능하다는 장점이 있다. 마이크로파 방전은 기체 중에 초기전자가 존재하여야 하며 이러한 초기전자를 만들기 위한 방법으로 직류 전계에 의한 방식과 고주파 전계에 의한 방식 두 가지가 있다. 이 방식 또한 방전공간 내부에 전극이 필요 없는 무전극방전 방식으로 2.45 GHz의 주파수를 사용하여 마이크로파 전력 0.1~5 W 정도로 안정적이며, 저온의 플라즈마를 생성 할 수 있다.

이러한 대기압에서의 플라즈마 생성은 교류 전원에 의하여

†E-mail: air3726@kopo.ac.kr
Color versions of one or more of the figures in this paper are available online.

플라즈마 공정 가스들이 이온 상태로 되면서 발생되며 주로 방전 메커니즘에 의하여 생성된다.[4-6] 분위기 가스의 이온화를 통하여 공정가스를 패닝효과로 다시 이온화 시키는 과정을 거치게 되며, 이때 분위기 가스로는 He, Ar, Xe, Kr 등과 같은 비활성기체를 사용하게 되는데,[7, 8] 이들 기체들은 낮은 압력과 대기압에서 모두 사용이 가능한 기체들이어서 운영비용이 적게 들며, 동작 시 마이크로파 등의 유해 전파도의 발생도 적은 이점이 있다.[8]

이러한 대기압 플라즈마를 여러 산업에 응용하면서 표면처리를 위한 핵심적 기술로 부각되고 있는데, 특히 FPD(Flat Panel Display), CVD(Chemical Vapor Deposition), Dry Echer와 같은 반도체 집적회로 제조과정의 세정공정에 활용되면서 소자의 고성능화에 중요한 기술로 발전되고 있고, 최근에 들어 Dry Ashing에 적용하려는 노력을 하고 있다.[9] 이와 같은 대기압 플라즈마를 이용한 에칭이나 박막형성, 표면처리 등은 일반적인 화학반응으로는 얻기 힘든 가공처리도 저온 상태에서 가능하기 때문에 반도체 공정작업에 활용하기 위한 연구가 진행되고 있다. 하지만 대기압 상태에서의 플라즈마는 기체의 평균 자유행정(Mean Free Path)이 매우 짧아 전자를 가속시키기 어려워 안정적인 플라즈마를 발생시키기 어렵다는 단점이 있다.

본 연구에서 사용된 대기압 플라즈마 발생장치는 코로나 방전 등과 같이 침 전극이나 선, 도체 등에 직류 전원을 가하여 불균일 방전을 일으켜 부분적으로 플라즈마를 발생하는 장치와는 다르게 교류전원을 사용하는 플라즈마 발생장치로써 서로 마주보고 있는 전극 사이에 교류전원을 인가하면 전기장에 의하여 공급되는 반응가스 내의 전자는 높은 에너지로 가속되며, 이렇게 가속된 전자는 주위의 산소나 질소 분자들과 충돌하여 산소원자이온을 만들거나 산소이온이 된다. 이러한 산소이온들은 불안정하여 주위의 전자들과 결합한 산소 라디컬로 되거나 산소이온과 결합하여 오존이 된다.(10,11) 초기반응에서 이런 산소 라디컬과 오존은 탄화수소 고리 끝의 탄소와 수소원자간의 결합을 끊어 표면에 묻어 있는 유기물들을 분해 하는 작용을 한다.

그리고 질소분자들도 분위기 가스가 이온화 되면서 질소이온이 되는데 이러한 질소분자 이온들도 유기물 잔해들의 연결고리를 해체하여 유기물을 세정하는 역할을 한다.

본 연구에서는 강화유리의 전 처리과정에서 유기물 제거와 표면처리 등을 위하여 플라즈마 처리를 활용하면 진공중의 증착방법에 비하여 저렴한 비용과 대량생산성이 보장이 되면서 많은 관심을 가지게 되었다. 그래서 본 연구에서는 이러한 대기압 플라즈마를 이용하여 스마트폰에 사용되는 강화유리 표면에 플라즈마 처리를 통한 강화유리 표면의 친수화 정도를 측정하는 실험을 하였다.

이러한 친수화 정도는 플라즈마 장치의 광특성을 조사와 플라즈마 처리 후의 접촉각을 측정하는 방법으로 조사하였다. 일반적으로 친수화는 산소이온에 의한 것으로 알려져 있으며, 본 연구에서는 산소가스의 분압에 대해서 조사하였다.

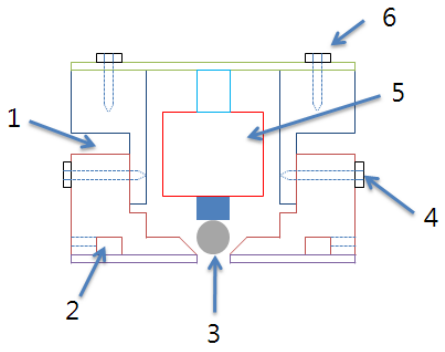

FIG. 1. Designed plasma head.

II. 실험장치 및 방법

본 연구를 위하여 제작된 플라즈마 발생장치는 Fig. 1과 같다. 실험을 위하여 기존의 플라즈마 장치를 사용하지 않고 전극간격의 조정이 용이한 새로운 형태의 플라즈마 장치를 개발하였다. 전극간격의 조정이 가능한 플라즈마 장치는 플라즈마 발생면적을 용이하게 변경 할 수 있어 장치를 새로 제작하지 않아도 되는 이점이 있다.

1. 높이 조절용 공간
2. 가스 완충공간
3. 1차전극
4. 간격 조절용 나사
5. 냉각장치
6. 높이 조절용 나사

Fig. 1에서 보는 바와 같이 1차전극(3)과 2차전극 사이에 가스 공급 홀(2)을 만들어 1차전극과 2차전극 사이에 공급되는 교류 에너지를 받아 공급되는 분위기 가스인 아르곤 가스가 이온화되도록 구성하였다.

사용된 전극들은 알루미늄를 사용하였으며 1차전극과 2차전극의 절연체로는 테플론과 세라믹을 사용하였다. 두 절연체에 의한 차이는 미미 하였으며, 두 전극의 간격에 의한 이온화 정도에는 큰 차이를 나타내지 않았다.

Fig. 2는 플라즈마 헤더에 가스를 공급하기 위한 가스공급 시스템 구상도이다. 실험에 사용된 다른 두 종류의 가스를 혼합하여 플라즈마에 장치로 공급하기 위한 장치로써 사용된 MFC(Mass Flow Controller)는 Kofloc사의 3660모델 2개를 사용하여 두 가지 가스를 혼합하여 공급할 수 있도록 설계하였으며, 이 MFC는 1 [SCCM(**S**tandard **C**ubic **C**entimeter per **M**inute)]에서 5 [SLM(**S**tandard **l**iters per **M**inute)]의 가스량을 조절할 수 있는 장치이다.

Fig. 3에서 보는 바와 같이 플라즈마 장치의 1차전극과 2차전극에 교류전원을 인가하기 위하여 교류전원장치(YSR-06MF, 600 W, 13.56 MHz)를 사용하였으며, 이 전원을 통하여 총 400 W까지의 입력실험을 수행하였다.

Fig. 4는 대기압 플라즈마에서 발생되는 광 스펙트럼을 측

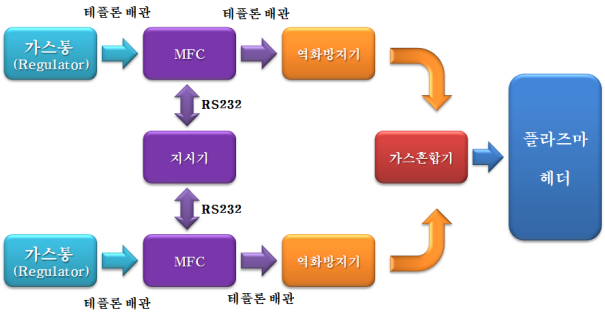

FIG. 2. Gas supply line for plasma device.

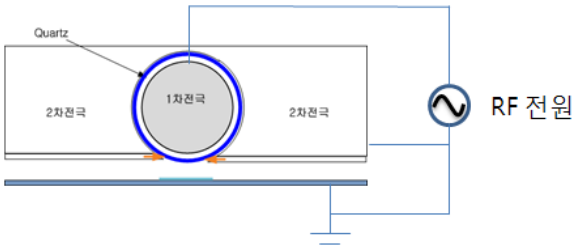

FIG. 3. Electrical connectivity of the plasma device.

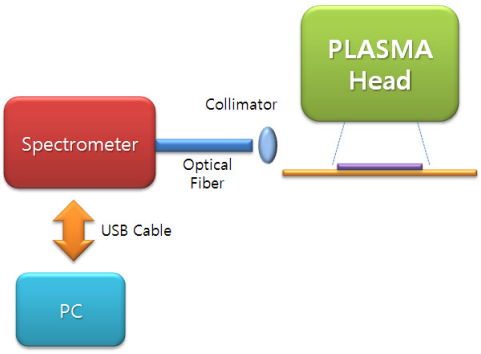

FIG. 4. Installation for spectrum investigation.

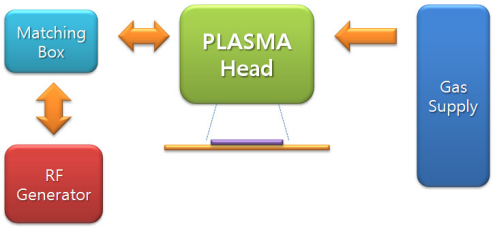

FIG. 5. Block diagram of the atmospheric plasma device.

정하기 위한 장치도로 플라즈마 장치에서 발생되는 광은 광케이블을 이용하여 스펙트로미터에 입력하였으며, 광케이블과 플라즈마 장치와의 거리는 10 cm 이다. 사용된 스펙트로미터는 Avantes사의 장비를 사용하였으며, 파장분석 영역은 200 nm~1100 nm 이다.

Fig. 5는 본 연구를 위하여 구성된 플라즈마 발생장치의 전체 구성도이다.

Fig. 5에서 보는 바와 같이 플라즈마 헤더에서 발생된 플라즈마는 시료가 놓여있는 3차전극쪽으로 이온들이 이동되는 형태로 발생되게 되며, 이때 공급된 분위기 가스인 아르곤 가스가 인가되는 교류 에너지에 의하여 이온화된다. 각 원자들의 이온화 에너지는 표1에 나타내었다.

TABLE 1. Ionization energy of the gases

기체명	이온화 에너지(eV)	기체명	이온화 에너지(eV)
Ar	15.755	Kr	14.0
O	13.6	Xe	12.1
N	14.5	O2	12.1
He	24.6	C	11.3

Table 1에서 보는 바와 같이 아르곤의 이온화 에너지가 질소의 이온화 에너지와 비슷하여 아르곤이온에 의한 패닝효과로 질소분자들이 쉽게 이온화 되는 것을 알 수 있다.

III. 실험결과 및 고찰

앞의 실험 장치들을 이용하여 제작된 대기압 플라즈마 장치의 광 특성에 대하여 조사하였다.

Fig. 6(a)는 제작한 대기압 플라즈마에서 방출되는 광 스펙트럼 사진이다.

Fig. 6(a)에서 보는 바와 같이 300 nm에서 400 nm에 걸쳐서 발생되는 스펙트럼이 질소(N_2) 이온의 광 방출 스펙트럼이며, 700 nm에서 850 nm까지가 아르곤이온의 광 방출 스펙트럼이며 이때 인가된 전력은 100 W이다.

Fig. 6(a)에서 아르곤이온의 광 방출 부분을 확대하면 Fig. 6(b)와 같다.

Fig. 6(b)에서 보는 바와 같이 아르곤이온은 696 nm, 763 nm와 810 nm의 주요 광 방출 스펙트럼이 보이는 것을 알 수 있다.

아르곤이온의 주 스펙트럼들은 Fig. 6(b)의 제일 큰 강도를 보이는 스펙트럼으로 잘 나타나 있으며. 이 라인들은 그것은 플라즈마 장치의 교류 전원에 의하여 공급된 아르곤 기체가 전리되었다는 것을 보여주고 있다.

Fig. 7은 아르곤이온에 의하여 전리된 질소(N_2)이온의 광 방출 스펙트럼이다. Fig. 7에 나타난 바와 같이 309 nm와 337 nm 그리고 357 nm에 광 발출 스펙트럼이 선명하게 나타나 있다. 이러한 광 방출 특성은 입력되는 에너지에 따라 점차 크게 나타나는 것을 실험을 통하여 알 수 있었다.

실험은 공급되는 아르곤 가스의 압력에 대하여, 아르곤 가스와 질소가스의 분압에 대하여, 그리고 입력되는 에너지에 따라서 실험하였다. 이것은 아르곤이온에 의하여 전리되는 질소이온의 양과 공급되는 아르곤기체의 양이 질소이온화에 미치는 영향 등에 대해서 연구하기 위함이다.

Fig. 8는 5 SLM의 아르곤 기체에 대하여 입력에너지를 100 W에서 200 W까지 증가하면서 방출되는 광 스펙트럼을 측정하였다. Fig. 8에서 보는 바와 같이 에너지가 커짐에 따라서 방출되는 아르곤이온의 광 방출 스펙트럼의 크기가 점

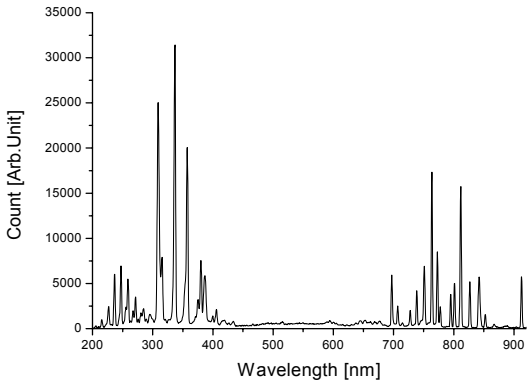

FIG. 6(a). Light spectrum of the plasma.

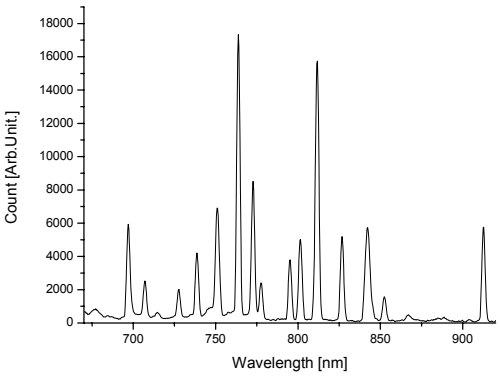

FIG. 6(b). Emission spectrum of the Argon gas.

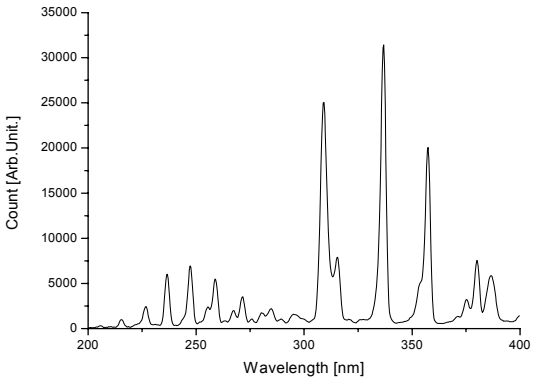

FIG. 7. Emission spectrum of the Nitrogen ions.

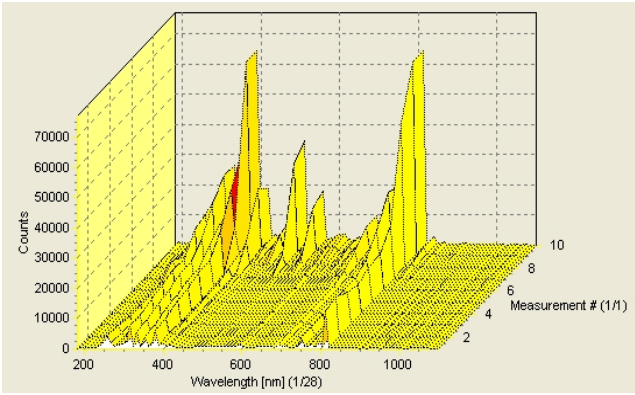

FIG. 8. Emission spectrum of the Argon ions(at 100[W]~300[W]).

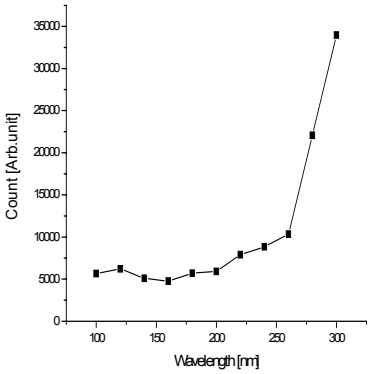

FIG. 9. Emission spectrum intensity of the Argon ions(at 763 [nm]).

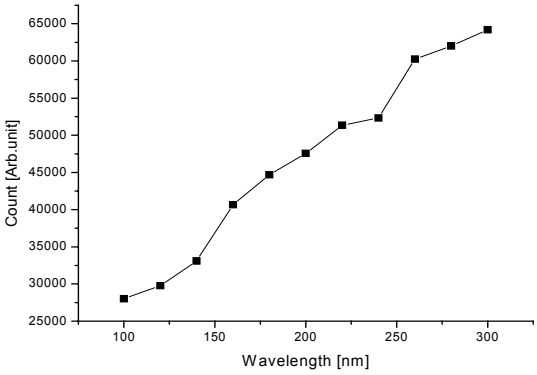

FIG. 10. Emission spectrum intensity of the Argon ions(at 100 [W]).

차로 커지는 것을 알 수 있다. 그리고 아르곤이온이 증가함에 따라 질소이온의 광 방출 크기 또한 커지고 있음을 알 수 있다.

Fig. 9는 아르곤이온의 대표 스펙트럼 라인인 763 nm에서의 광 방출 스펙트럼의 세기를 100 W에서 300 W까지 에너지를 변화해 가면서 측정한 데이터 이다.

Fig. 9의 그래프에서 나타나 있는 것처럼 에너지가 증가함에 따라 방출되는 아르곤이온의 세기도 저차 커지는 것을 알 수 있다.

Fig. 10은 인가되는 에너지를 100 W에서 300 W로 증가하면서 아르곤이온에 의하여 이온화되는 질소이온들의 광 방출 스펙트럼의 세기를 측정하였다.

Fig. 10은 입력전압에 따른 아르곤이온의 광 방출 강도를 측정하였다. 보는 바와 같이 입력 에너지가 커짐에 따라 아르곤이온의 광 방출 강도가 증가 하면서 질소이온의 광 방출 강도도 증가하는 것을 알 수 있었다. 이는 전리된 아르곤이온이 질소를 이온화하는데 영향을 주고 있음을 보여주고 있다.

Fig. 11은 아르곤 기체의 흐름을 2.5 SLM에서 5 SLM까지 변화시키면서 아르곤이온의 광 방출 스펙트럼의 강도를 측정하였다. Fig. 12에서 위쪽에 있는 라인은 200 W일 때의 데

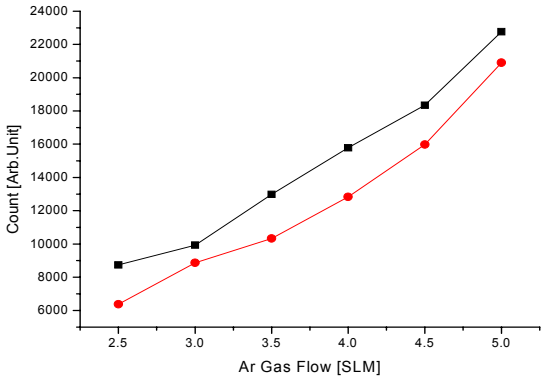

FIG. 11. Emission spectrum intensity of the argon ions(at nitrogen gas pressure).

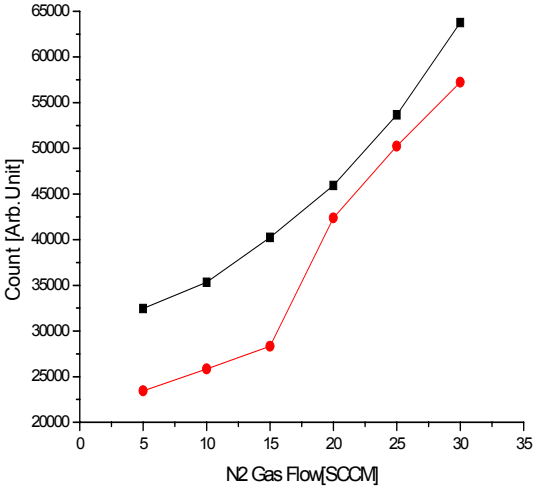

FIG. 12. Emission spectrum intensity of the nitrogen ions(at Argon gas pressure).

이터 이며 아래쪽의 라인은 100 W일 때의 강도를 나타낸 것이다.

Fig. 11에서 보는 바와 같이 공급되는 아르곤 가스의 양이 커짐에 따라 전리되는 아르곤이온의 양이 많아짐을 알 수 있었으며, 또한 입력 에너지에 따라서도 입력에너지가 클 때 아르곤이온의 양이 커짐을 알 수 있었다.

Fig. 12는 아르곤 기체의 흐름을 5 SLM과 3 SLM으로 하였을 때 질소가스의 흐름을 5 SCCM에서 30 SCCM까지 변화해가면서 질소이온의 광 방출 스펙트럼의 세기를 측정하였다. Fig. 12에 나타난 것과 같이 공급하는 질소가스의 양을 증가는 질소이온의 발생량과 비례하여 나타났다. Fig. 12에서 위쪽에 있는 라인은 입력 에너지를 100 W로 하였을 때이며, 아래쪽의 라인은 입력 에너지를 200 W로 하였을 때이다.

위의 다양한 입력 조건에 대한 플라즈마 처리된 강화유리의 접촉각을 측정하여 실제 강화유리 표면의 친수화 정도를 측정하였다. 통상 친수화 정도는 10도 이하의 접촉각을 가지는 경우를 말하는데 본 연구에서 어느 정도의 접촉각을 갖는지를 조사하였다.

Fig. 13은 접촉각을 측정하기 위한 실험장치 사진이다. 접

FIG. 13. Installation for the measurement of the Contact angle.

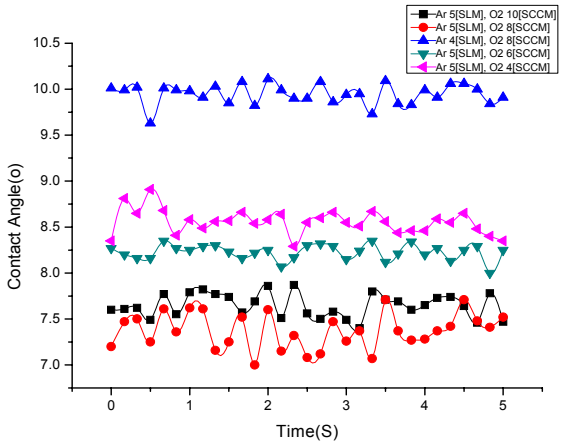

FIG. 14. Contact angle (as 250 [W], Ar 5 [SLM], O_2 4~10 [SCCM]).

촉각 측정에 사용된 장치는 Biolin Scientific사의 Theta Lite 100 장비를 사용하였다. 장비 동작 모드는 반자동 모드로 측정하였다. 데이터의 수집을 위하여 노트북을 사용하였으며 노트북과 장치와의 연결은 USB를 이용하였다. 측정대 위에 올려진 표면 처리된 강화유리 위에 물방울을 떨어뜨려 강화유리 표면과 물방울이 이루는 각을 측정하는 방식으로 조사되었다. 사용된 시료는 두께 0.7 mm의 고릴라 글라스를 사용하였으며, 크기는 10.1인치와 3.5인치 시료를 사용하였다. 처리방법은 일정한 입력에너지에 대해서 아르곤 가스의 압력과 산소 가스의 압력을 변화해 가면서 실험하였다.

Fig. 14에서는 Fig. 13과 같이 설치된 장치에서 250 W의 입력전력에 대하여 아르곤 가스 5 SLM과 4 SLM 그리고 산소가스 4 SCCM에서 10 SCCM으로 처리된 시료에 대한 접촉각을 측정한 결과이다. 위의 Fig. 15에서 보는 바와 같이 공급되는 산소 가스의 양을 조금 늘려서 처리한 측정한 접촉각 데이터 그래프에서 아르곤 가스의 분압을 5 SLM인 상태에서 산소가스의 분압을 4 SCCM에서 10 SCCM으로 증가시키면서 시료의 접촉각을 측정한 결과 8 SCCM에서 제일 좋은 결과를 보였으며, 아르곤의 분압을 4 SLM으로 하였을 때는 5 SLM으로 하였을 때보다 전체적인 접촉각이 낮아짐을 알 수 있다. 이것은 아르곤 가스에 의하여 이온화되는 산소이온의 숫자가 줄어들어 나타나는 현상이라고 예측된다.

위의 실험결과로 볼 때 본 연구에서 사용된 아르곤 가스와 산소 가스의 분압 조건에서는 아르곤 5 SLM에서의 산소 8 SCCM

분압비가 가장 좋은 결과를 보임을 알 수 있었다.

IV. 결 론

본 연구에서는 제작된 플라즈마 장치에 대하여 광 방출 특성과 접촉각을 조사하였다. 공급되는 분위기 가스인 아르곤 가스에 의하여 질소가스가 이온화되며, 이때 이온화되는 정도를 방출되는 광의 세기를 측정하여 조사하였다. 그리고 공급되는 아르곤 가스의 양에 대하여, 공급되는 질소가스의 분압에 대하여, 그리고 입력 에너지에 대하여 각각 방출되는 광 스펙트럼의 세기를 조사하였다.

우선 이르곤 가스를 5 SLM 정도 공급하면서 100 W에서 아르곤이온과 질소이온이 발생되는 것을 확인하였다. 아르곤 이온의 특성 스펙트럼 라인인 700 nm과 850 nm이 나타났다. 그리고 질소이온의 광 방출 스펙트럼인 309 nm와 337 nm 그리고 357 nm도 나타남을 알 수 있었다. 실험에서 아르곤 이온의 광 방출 강도의 증가에 따라 질소이온의 광 방출 강도 또한 증가하는 것을 알 수 있었다. 위의 결과로 볼 때 아르곤 기체가 이온화되면서 비슷한 전리에너지를 가지고 있는 질소를 이온화 시켰다는 것을 알 수 있었다.

분위기 가스인 아르곤 가스의 공급량을 2.5 SLM에서 5 SLM까지 변화하면서 아르곤이온의 광 방출 스펙트럼을 측정한 결과 아르곤 가스의 양이 커질수록 전리되는 아르곤기체의 양이 커짐을 알 수 있었다. 아르곤 기체에 혼합하여 공급한 질소기체의 양을 변화해 가면서 조사한 질소이온의 광 방출 스펙트럼의 강도 조사에서는 공급되는 질소가스의 양이 커질수록 전리되는 질소이온의 양이 많아짐을 방출되는 질소이온의 광 스펙트럼의 세기를 통하여 알 수 있었다.

본 연구를 통하여 공급되는 아르곤 가스의 양과 혼합되는 질소가스의 양이 이온화되는 정도에 영향을 미친다는 것을 알 수 있었다. 그리고 표면 처리된 강화유리에 대하여 접촉각을 측정하여 본 결과 공급되는 산소가스의 양이 늘어남에 따라 접촉각이 점차로 줄어드는 특성을 알 수 있었으며, 인가되는 전압이나 공급되는 아르곤 가스의 양이 늘어남에 따라서는 접촉각이 낮아짐을 알 수 있었다. 본 연구를 통하여 플라즈마 처리된 강화유리의 표면이 평균 7~8도 정도의 접촉각을 가짐을 알 수 있었다. 친수화된 표면은 강화유리표면의 인쇄공정에 필요한 처리로 알려져 있다.

표면 개질의 효과는 사용하는 가스의 종류에 따라 그 특성이 다르게 나타나며 그 특성은 표면 개질 후 적용될 공정의 종류에 따라 결정이 될 것이다.

References

1. M. Laroussi, “Low temperature plasma-based sterilization: overview and state-of-the-art.” Plasma Processes and Polymers **2**, 391-400 (2005).
2. R. Brandenburg, J. Ehlbeck, M. Stieber, Th. von Woedtke, J. Zeymer, O. Schluter, and K. D. Weltmann, “Antimicrobial treatment of heat sensitive materials by means of atmospheric pressure rf-driven plasma jet,” Contrib. Plasma Phys. **47**, 72-79 (2007).
3. K. D. Weltmann, R. Brandenburg, Th. von Woedtke, J. Ehlbeck, R. Foest, M. Stieber, and E. Kindel, “Antimicrobial treatment of heat sensitive products by miniaturized atmospheric pressure plasma jets,” Appl. Phys. **41**, 194008 (2008).
4. F. B. Rointan, *Deposition Technologies for Films and Coatings Handbook* (Noyes Publications, Park Ridge, NJ, USA, 1994).
5. G. Francis, *Ionization Phenomena in Gases* (Butterworths Scientific Publication, London, UK, 1960).
6. A. D. MacDonald and S. J. Tetenbaum, “Gaseous electronics handbook,” in *High Frequency and Microwave Discharges, Vol. 1* (Academic Press, New York, USA, 1978).
7. K. G. Michlewicz, J. J. Urh, J. W. Carnahan, “A microwave induced plasma system for the maintenance of moderate power plasmas of helium, argon, nitrogen and air," J. Anal. At. Spectrometry **40B**, 493-499 (1985).
8. E, Poussel, J. M. Mermet, D. Deruaz, and C. Beaugrand, “Evaluation of a microwave-induced plasma as a soft ionization source in mass spectrometry,” Anal. Chem. **60**, 923-927 (1988).
9. J. W. Coburn, R. A. Gottscho, and D. W. Hess, “On the balance between silylene and silyl radicals in rf glow discharges in silane: the effect on deposition rates of a-Si:H,” J. Appl. Phys. **62**, 2803-2811 (1897).
10. H. Conrads and M. Schmidt, “Plasma generation and plasma sources,” Plasma Sources Sci. Technol. **9**, 441-454 (2000).
11. N. St J. Braithwaite and R. N. Franklin, “Reflections on electrical probes,” Plasma Sources Sci. Technol. **9**, 517-527 (2000).