

## 플라즈마를 이용한 살균

플라즈마는 직간접적으로 우리 생활에 많이 이용되고 있다. 우리가 매일 받고 있는 햇빛이 플라즈마 상태인 태양으로부터 나온 가시광선이며 현대 산업의 쌀이라 불리는 반도체 가공의 많은 부분에 플라즈마가 이용되고 있다. 실내에서 이용하고 있는 공기 청정기나 살균기 등도 플라즈마를 이용한 제품이 많다. 우리 생활에서 사용되는 플라즈마는 상당부분 직류 방전을 이용해서 만들어져 있다. 물론, 라디오 주파수 방전이나 마이크로파 방전 등도 있지만 이들은 전원 공급 장치가 비싸고 발생 방식이 복잡하여 아직까지는 주변에서 쉽게 볼 수 없다. 직류 방전은 양극과 음극 두 판을 만들고 이 사이에 전압을 가해 주어 방전을 일으켜 플라즈마를 발생하는 방식인데, 전류전압 관계에 따라 암방전(어두운 방전), 글로우 방전(밝은 방전) 아크(arc) 방전으로 나뉘어진다. 암방전은 전류의 양은 낮은 대신 전극의 전압은 아주 높은 것이 특징이며 대부분의 경우 발광 현상이 미약하다. 암방전 중에서 상대적으로 전류가 높은 영역을 코로나 방전이라 부르는데, 이 영역의 플라즈마가 우리 주변 생활에 많이 이용된다. 이러한 예로는, 공기 정화기 내부의 집진 장치를 들 수 있는데, 공기가 코로나 방전 영역을 통과하면서 공기에 포함된 미세 입자들이 전하를 띄게 되고 이렇게 하전된 입자가 방전 판에 부착되어 공기를 정화하게 된다. 또한, 살균 장치의 오존 발생 장치의 경우 많은 경우가 코로나 방전을 이용, 산소를 분해하여 오존을 발생시키고 이러한 오존을 이용하여 살균을 한다. 이외에도 산업적 재료 표면의 친수성, 접착성, 염색성 등의 향상을 위해서도 코로나 방전이

표 1. Various plasma sources of atmospheric pressure plasma

| Plasma type                            |  | Features   | Use   |
|--|--|--|---|
| Corona discharge                       |  | Weak ionization<br>Difficult control   | Air purification<br>Ozon generation<br>Surface processing |
| Dielectric barrier discharge (DBD)     | Streamer discharge                                       | Simple structure<br>Non-uniform  |   |
|  | Atmospheric pressure glow discharge (APGD)               | Uniform plasma<br>High efficiency<br>Difficult control                       | Light (zenon, neon sign)                                  |
|  | Ferroelectric bed discharge (FBD)<br>Capillary discharge | Surface discharge<br>Complicated structure<br>High efficiency<br>Non-uniform |   |
| Microhollow cathode discharge (MHCD)   |  | Small plasma volume  |   |
| Atmospheric pressure plasma jet (APPJ) |  | 3D plasma<br>High efficiency<br>High cost (RF, He)                           |   |

널리 이용되며 정전기 제거 장치 등에도 이용되고 있다. 글로우 방전은 빛을 내기 때문에 조명으로 많이 이용되고 있다. 형광등, 네온 싸인, 제논 램프 등이 이에 해당한다. 이러한 방전에서는 기체를 봉입한 유리관의 양끝에 전극이 삽입되어 있고 이들 전압을 인가하면 방전이 일어난다. 아크 방전은 빛과 함께 많은 열을 내기 때문에 조명뿐 아니라 절단, 용접, 용융 등의 처리에도 이용될 수 있다.

플라즈마의 의학적 응용 최근에 플라즈마를 이용한 응용기술 중 가장 주목을 받고 있으며 가장 활발하게 연구되고 있는 부분은 소위 ‘플라즈마 의학’이라고 하는 의료관련 연구이다. 초기 의료용 플라즈마 기술의 연구는 미국방성 소속의 연구소 (Defense Advanced Research Project Agency)가 미 육군이 전염성 미생물을 살균하기 위해 사용하는 살균용 약품과 살균용 화학물질을 대체하기 위한 연구를 지원하면서 시작되었다. 이 플라즈마 장치는 미 육군이 멀리 떨어진 해외 지역으로 병참용 보급품을 필수적으로 공급해야 하는데, 이때 방해가 되는 전염성 미생물을

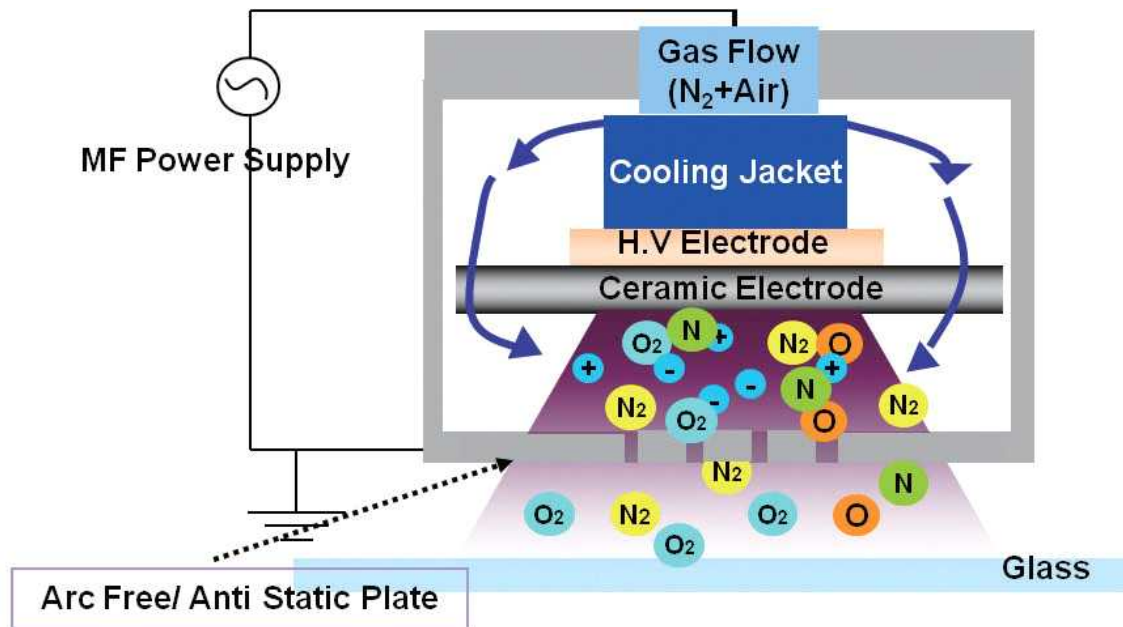


그림 1. Schematic view of the plasma system. Plasma may permit a flux of various active uncharged species of atoms and molecules. These active uncharged species generated in plasma will typically include ozone (O3), NO, OH radicals, etc

살균하고, 마찬가지로 전쟁터에서 평화를 지키며, 작전을 안전하게 수행하는 장비로 사용하기 위해 개발되었다. 참여했던 연구원들이 찾아낸 이 저온 플라즈마는 원인과 결과에 관계없이 살아있는 세포 상에 기생 하는 박테리아를 최단 시간 내에(탄

저균에 의한 탄저병, 대장균, 연쇄구균과 포도상구균을 포함해서) 살균한다. 그림 1은 PSM이라는 plasma 기기회사에서 제공받아 연구를 시행했던 저온상압(nonthermal atmospheric pressure) 플라즈마 기기의 모식도와 플라즈마 발생 시를 보여준다. 이 기기를 이용하여 대장균과 탄저균에 플라즈마 처리를 한 경우 30초 이내에 대부분이 살균되는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 살균효과와 더불어 플라즈마에 사용하는 gas의 종류에 따라 다른 플라즈마의 효과를 기대할 수 있는데, 질소가스를 이용한 경우 상처치유를 촉진할 수 있다는 연구결과가 보고되었다. 질소가스가 상처치유를 촉진하고 살균 작용과 염증작용을 조절한다는 효과를 통해 다양한 임상환자에 실제 적용하고 있는 상황이다. 이러한 작용에는 질소 가스에 의해 만들어지는 NO가 중요한 역할을 하는 것으로 알려져 있다. 질소 가스에 의한 플라즈마가 형성되면서 NO가 O<sub>2</sub>-와 결합하여 peroxy nitrite를 형성하여 직접적인 항균작용을 나타내고 대식세포(macrophage, neutrophil)의 기능을 강화하고, 병원균에 치명적인 산소유리기(free oxygen radicals)가 유도되는 것으로 보고되고 있다. 상처 치유 측면에서도 질소가스에서 형성되는 플라즈마가 상처부위의 미세혈액순환(microcirculation)을 촉진하고, 상처부위의 면역기능을 강화하고, 상처치유에 도움이 되는 각종 cytokine의 분비를 유도하고, 섬유아세포(fibroblast)와 각질세포(keratinocyte)의 증식과 콜라겐의 생성을 촉진하여 상처치유를 유도한다고 보고되었다. 또한 저온 상압 플라즈마는 지혈작용에 매우 유용한 것으로 다양한 검사에서 확인이 되었다. 지혈작용과 관련된 연구에서 보면 큰 상처 부위에서 출혈이 일어나면 멈추는데, 10~20분이 걸리는 데 반해 플라즈마에 노출시키면 단지 15초 만에 출혈이 멈추며, in vivo 실험에서는 피부의 상처에 대해서도 플라즈마가 신속한 상처치유에도 도움을 주는 것으로 나타났다. 또 하나 플라즈마의 흥미로운 임상적용의 예로서 치과영역과 피부과를 들 수 있는데, 치과의 경우 치아미백 치료에 많이 이용되어 왔다. 피부과의 경우 가장 활발하고 일찍 플라즈마의 임상적용을 시도하여 이미 다양한 플라즈마 기기가 사용되고 있는 상황이다. 주된 사용범위는 플라즈마를 통해 피부의 주름과 색소질환을 치료하고자 하는 것이다. 주로 40~60대 중장년층의 노화로 인한 주름 및 검버섯, 잡티 등 난치성 색소질환 치료에 이용된다. 주름과 광선 각화증, 얼굴의 양성 피부 병변 치료 부분에 FDA 승인을 받아 활용되고 있다. 플라즈마 기체를 기계적인 방법으로 피부 속 진피 조직에 전달해 새로운 피부가 재생되도록 만드는 방식이다. 에너지 조절이 쉬운 질소 가스에 고주파 에너지를 통과시켜 고에너지의 플라즈마 가스를 형성한 뒤 기체를 통해 피부 속으로 분사해 피부 속에 직접적인 열에너지를 전달하는 방식으로 진피 부위에 새로운 콜라겐 재생을 유도한다.

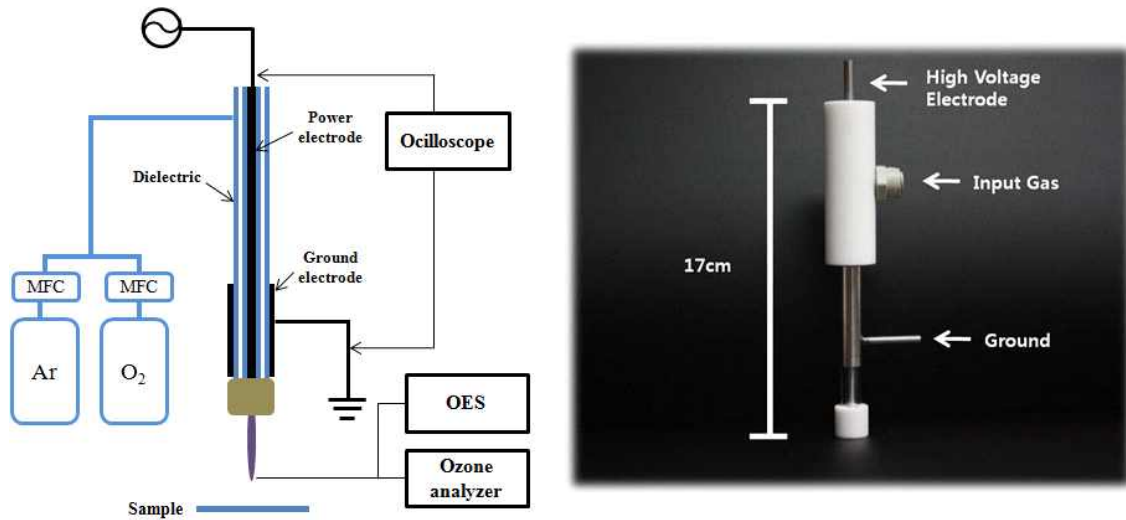


그림 2. Schematic diagram and picture of torch- type atmospheric pressure plasma system.

아르곤과 산소의 혼합기체를 사용한 상압 플라즈마 반응기(그림 2)에서 생성되는 오존의 농도는 플라즈마 반응기의 방전기체 출구에서 10 mm 떨어진 지점에서 측정된 결과를 그림 3에 나타내었다. 혼합기체 내에 산소의 비율을 5 %에서 20 % 까지 올리고 인가전력도 60 W에서 100 W까지 높임에 따라 오존 농도는 모두 증가하는 경향을 보였다. 100 W의 인가전력에 20 % 산소비율에서 415 ppm으로 가장 높은 오존농도를 얻을 수 있었다. 오존 농도의 증가율은 인가전력보다 혼합기체 내의 산소비율에 더 영향을 받음을 나타내었다. 높은 농도의 오존을 얻기 위해서 가급적 높은 인가전력과 산소비율이 높은 혼합기체가 유리하다. 다만 혼합기체내의 산소비율이 높음에 따라 플라즈마의 방전효과가 저하되어 flame의 발생이 현격하게 저하된다.

토치형 상압 플라즈마에 의한 살균효과는 배지 위에 생성된 *E. coli* 균이 담긴 시료에 플라즈마를 조사하여 분석하였다. 살균처리 공정에서 반응기에 유입되는 혼합기체에서 아르곤을 3 L/min으로 고정하였을 때 산소 공급이 150, 300, 450, 600 sccm일 때 혼합비율이 5 %, 10 %, 15 %, 20 %라 하였다. 방전조건으로 입력전압은 2.28 kV (60 W), 3.18 kV (80 W), 4.15 kV (100 W)였으며, 시료와 반응기와의 거리는 10 mm였으며 처리시간은 0에서 180초까지 변화시켰다.

그림 4는 토치형 상압 플라즈마 반응기에 전달되는 입력전압에 따른 국부 살균 효과를 나타낸다. 이때 산소의 혼합비율은 15 %이고 처리 시간은 90초였다. (a)의 경우는 플라즈마 처리를 하지 않고 배양시킨 상태이며, 나머지는 반응기와 거리가

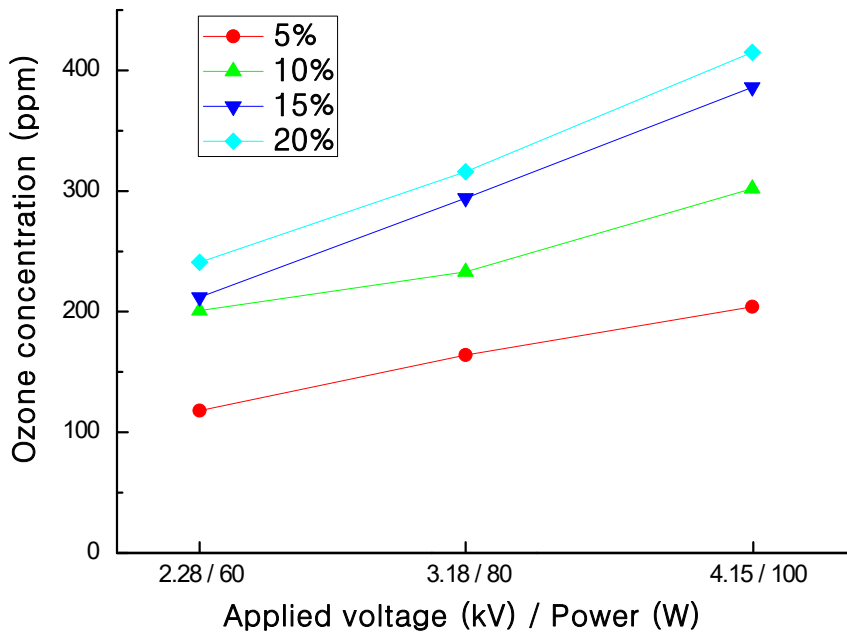


그림 3. Ozone concentration of plasma flame at 10mm from plasma exit.

10 mm에서 플라즈마로 가운데 부분을 조사하였다. (b)는 2.28 kV (60 W)로 플라즈마에 노출된 부분은 *E. coli*가 사멸되는 것을 확인할 수 있으나, 처리하지 않은 부분은 살아있음을 확인하였다. (d)는 4.15 kV (100 W)로 가운데 부분 외에도 시료 전체적으로 살균효과가 있음이 확인되었다. 이 결과는 입력전압이 증가함에 따라 플라즈마 flame의 크기와 오존의 농도가 증가하는데 기인하는 것으로 판단된다. 산소 라디칼( $O^*$ )과 오존을 피 처리물 위로 분출시켜서 유기물을 제거하는 것처럼 오존의 증가가 살균효과증가에 결정적인 역할을 하는 것을 알 수 있다.

그림 5는 반응기로 유입되는 기체의 혼합비율에 따른 국부 살균 효과를 나타내었다. 입력전압이 4.15 kV (100 W)에서 반응기로 유입되는 아르곤은 3 L/min으로 고정시킨 후 산소혼합비율을 5 %, 10 %, 15 % 20 %에 대한 국부 살균 효과를 알아보았다. (a)는 플라즈마 처리를 하지 않고 배양시킨 상태이며, (b)는 아르곤만을 써서 국부살균실험을 실시하였다. (b)의 경우 플라즈마 flame이 직접 닿는 부분만 살균이 되는 것을 확인할 수 있었다. 반면, 산소를 혼합하여 플라즈마를 발생시킬 경우 혼합비율이 20 %일 경우 오존농도는 415 ppm까지 발생되었으며 산소비율에 따라 큰 면적에 국부살균효과가 발생하는 것을 알 수 있다. 이는 아르곤만을 이용한 플라즈마에서는 flame이 닿는 부분에서만 살균이 이루어지는 것은 오존발생이 flame부분에만 국부적으로 소량 발생하거나 flame에 의한 직접 살균 효과에 기

인하는 것으로 해석된다. 따라서 flame에의 노출과 적당한 오존농도에서의 처리가 결합하면 보다 효율적인 살균효과를 얻을 수 있을 것으로 해석된다.

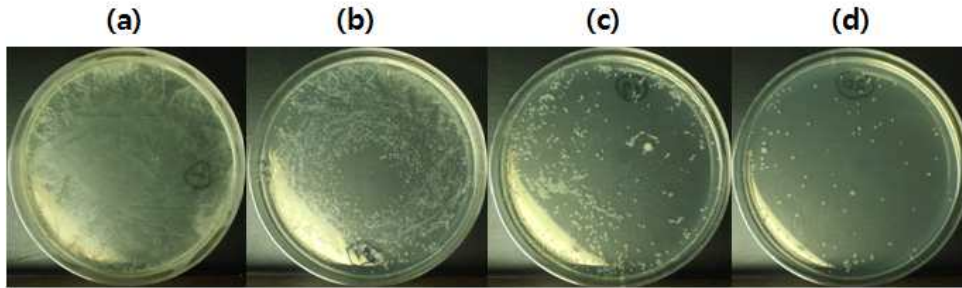


그림 4. Photographs of Petri dishes showing sterilization effect of plasma treatment with various applied voltages. Plasma parameters: driving frequency=30kHz, argon flow rate=3L/min, oxygen flow rate=450sccm, treatment time=90sec, applied voltage=(a) no treatment(reference), (b)2.28kV<sub>peak</sub>,(c)3.18kV<sub>peak</sub>,(d)4.15kV<sub>peak</sub>.

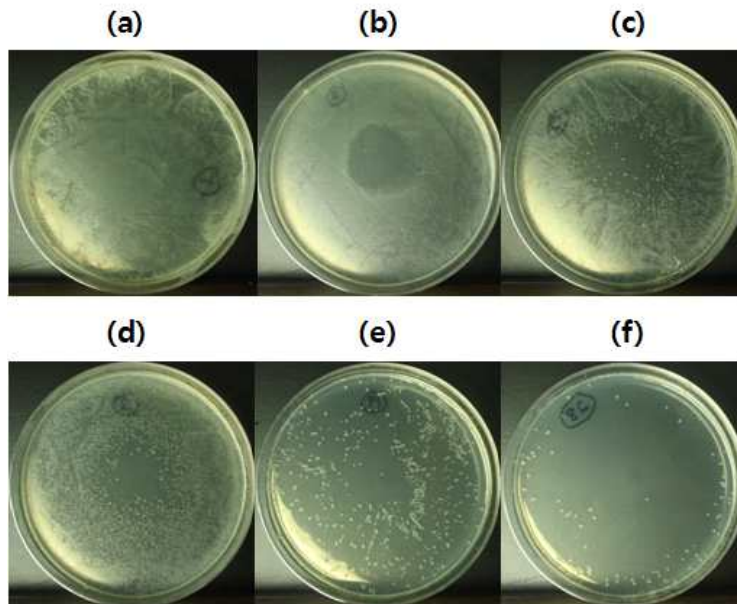


그림 5. Photographs of Petri dishes showing sterilization effect of plasma treatment with various oxygen ratios in mixture gas. Plasma parameters: driving frequency=30kHz, applied voltage=4.15kV<sub>peak</sub>, treatment time=90sec,

(a)notreatment(reference), (b)0%(argonflowrate=3L/min),  
(c)5%(argonflowrate=3L/minandoxygenflowrate=150sccm),  
(d)10%(argonflowrate=3L/minandoxygenflowrate=300sccm),  
(e)15%(argonflowrate=3L/minandoxygenflowrate=450sccm),  
(f)20%(argonflowrate=3L/minandoxygenflowrate=600sccm).

- 참고문헌: 1. Korean J. Otorhiolaryngol-Head Neck Surg. 53 (2010) 593  
2. Korea Chemical Engineering Research 49 (2011) 835