

상압 플라즈마 방전 원리

1. 서론

물질의 상태는 고체, 액체, 기체로 나눌 수 있는데 기체 상태의 물질에 에너지를 가해 주면 원자나 분자에서 전자가 분리되어 전자와 이온들이 존재하는 플라즈마 상태가 된다. 플라즈마는 화학적으로 반응성이 큰 매개체이다. 여기(activated)되어지는 방법과 작동 에너지에 따라 낮거나 혹은 높은 온도의 환경을 만들어낼 수 있으며, 각각 저온 플라즈마 또는 열 플라즈마로 구분된다. 이러한 넓은 온도 변화폭으로 인해 플라즈마 기술은 표면 코팅, 가스 처리, 폐기물 제거, 화학적인 합성, 기계작업 등의 다양한 분야에서 응용이 가능하다.

열 플라즈마, 특히 아크 플라즈마는 주로 항공분야에서 광범위하게 산업화 되었다. 저온 플라즈마 기술은 마이크로 전자 분야에서 발전했지만, 진공장비에 의해서 기술도입이 제한된다.

일반적으로 플라즈마를 방전 시킬 때에는 대기압인 760 Torr 정도의 압력에서 발생시키는 것 보다 대기압보다 낮은 1 mTorr ~ 100 Torr 정도의 압력에서 발생시키는 것이 더 쉬운데 이 때문에 대부분의 플라즈마는 대기압 보다 낮은 압력에서 방전되고 있다. 그런데 이렇게 낮은 압력에서 플라즈마를 발생시키려면 진공 용기를 제작하고 진공을 유지하기 위해 진공 펌프를 장착해야 하는 등 여러 가지 제약 조건이 따르는데 이러한 이유로 진공이 아닌 대기압에서 플라즈마를 발생시키는 방법에 대한 많은 연구가 이루어지고 있다. 상압 플라즈마는 진공 플라즈마에서 요구되는 진공장비도 필요치 않으며, 장비 값이 비교적 쌀 뿐만 아니라 장비관리비와 작동비용도 저렴하다. 또한, 최근에는 대기압 플라즈마 방전이 많이 발전하여 옷감이나 금속 물질들의 표면 처리에 실제로 응용되는 경우가 늘어나고 있다.

지금까지는 플라즈마를 발생하는 압력에 따라 대기압 플라즈마와 저압 플라즈마로 분류하였는데 한편으로는 플라즈마를 발생시키는 방법에 따라 열적 플라즈마 방전과 비-열적 플라즈마 방전으로 나눌 수도 있다. 열적 방전은 가스를 Joule heating 등을 이용하여 가열하여 이온화를 하는 방법이고 비-열적 플라즈마 방법은 가스의 가열은 최소화하고 주로 전자를 가열하여 이온화를 시키는 방법이다.

2, 플라즈마의 기본원리

2.1. 플라즈마의 정의

플라즈마는 이온화 된 기체이다. 이는 물질의 4번째 상태이며 우주 전체의 99%이상을 구성한다. 플라즈마는 기본상태 혹은 여기상태의 전자, 이온 및 중성자로 이루어진다. 거시적인 관점에서 볼 때 플라즈마는 전기적으로 중성이며, 플라즈마는 자유 대전 정공을 포함하며 전기 전도성이 있다



그림 1 플라즈마의 정의

2.2. 플라즈마 발생

플라즈마 기체에 에너지를 가함으로서 발생되는데, 화학종(분자, 원자)의 전자구조를 알아보기 위해서 또는 여기 화학종이나 이온을 만들기 위해서 사용된다. 가해지는 에너지는 열이나 전류 및 전자기 복사에 의해서 전달될 수 있다.

앞으로 알아보게 되는 상압 플라즈마는 전기에너지에 의해서 발생된다. 전기장이 기체의 전자에 의해서 발생된다. 전기장이 기체의 전자에 에너지를 전달하여 대전된 화학종이 되고, 충돌에 의해 중성 화학종에 에너지가 전달된다.

플라즈마가 발생하는 과정을 간단히 설명하기 위하여 가장 간단한 플라즈마 발생장치를 생각해 보면 다음과 같다. 먼저 평면으로 된 두 개의 도체를 일정한 거리 d 만큼 떨어트려 놓은 뒤 도체에 직류 전압 V 를 가해준다. 이렇게 되면 두 개의 도체 사이에는 일정한 전기장이 생성되게 되는데 이때 생성되는 전기장 E 는 전압에 비례하고 거리에는 반비례하는 $E=V/d$ 인 조건으로 생성된다. 이 때 전압의 세기가 어느 정도 이상이 되면 음극이 연결된 도체 판에 작은 수의 전자가 생성되기 시작하고 이 전자들이 전극을 따라 양극으로 움직이게 되면서 두 도체 사이에 존재하는 가스들과 충돌을 일으키게 되며 결과적으로 가스들은 이온화 시키게 되면서 방전이 일어나게 된다. 이러한 과정을 전자 사태에 의한 방전 개시라고 부른다. 이 때 이온들은 전기장을 따라 음극으로 움직이게 되고 음극에 연결된 도체 판에 세게 부딪치면서 음극에서 전자들이 튀어나오게 하면서 플라즈마 발생을 가속화 시키는데 이러한 과정을 2차 발산이라 부른다.

2.3. 플라즈마의 분류

공급되는 에너지의 종류와 플라즈마로 전달되는 에너지의 양에 따라 전자밀도와 전자온도로 나타나는 플라즈마의 물성치는 달라진다.

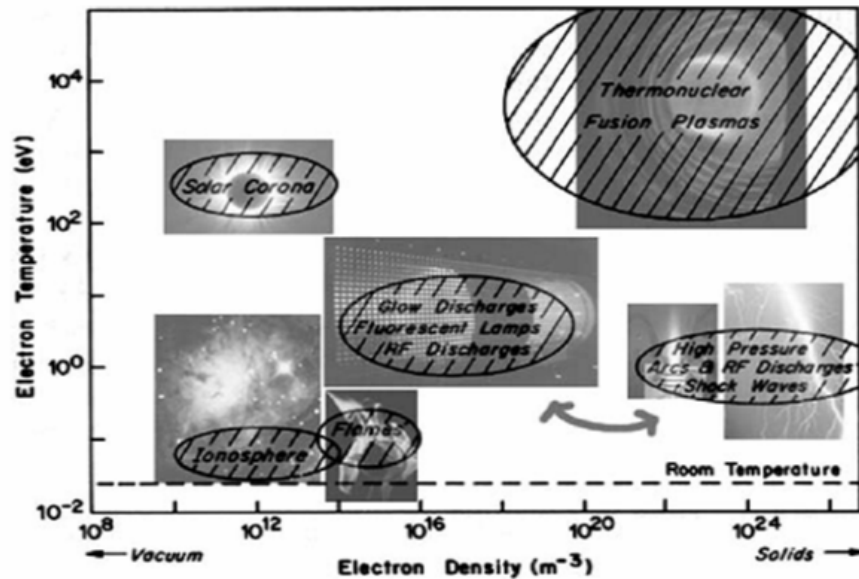


그림 2 전자온도와 밀도에 따른 플라즈마의 분류

이러한 구분을 통해서 국소열평형 플라즈마(local thermodynamic equilibrium plasma)와 비국소열평형 플라즈마(non-local thermodynamic equilibrium plasma)로 나눌 수 있다. 국소열평형 플라즈마는 전이(transition)와 화학반응이 복사과정이 아닌 충돌에 의해서 지배되는 경우이다. 그리고 충돌현상은 미소-가역적(micro-reversible)이어야 한다. 즉 모든 종류의 충돌을 그 역반응과 균형을 이루어야 한다는 것이다.

뿐만 아니라 국소열평형에서는 온도, 밀도 및 열전도로 나타나는 플라즈마 물성치들의 국소구배가 플라즈마 내의 입자가 평형에 도달할 수 있을 정도로 충분히 작아야 한다. 즉 확산 시간이 ~~입자가 평형에 도달하는 시간~~ 입자가 평형에 도달하는 시간보다 크거나 비슷해야만 한다. 국소열평형 플라즈마에서 무거운 입자의 온도는 전자의 온도에 가깝다.

비국소열평형 플라즈마는 전자들과 무거운 입자들의 질량 차이에서 야기된다. 전자들은 매우 빠르게 움직이는 반면 무거운 입자들은 정지했다고 생각할 수 있다. 때문에 전자가 충돌과 전이를 지배하고 있다. 국소열평형에서 벗어나는 또 다른 이유로는 플라즈마 내에서의 강한 구배와 관련된 확산효과 때문이다.

비국소열평형 플라즈마는 2-온도 모델로 설명될 수 있다. 두 온도는 전자 온도(T_e)와 무거운 입자 온도(T_h)를 의미한다. 전자와 무거운 입자간의 엄청난 질량차를 고려할 때, 플라즈마 온도(또는 기체 온도)는 T_h 로 고정된다. 국소열평형에서 벗어날수록 T_e 와 T_h 의 차이는 커진다. 표 1 은 국소열평형 플라즈마와 비국소열평형 플라즈마의 주요한 특성을 정리한 것이다.

표 1 LTE와 non-LTE의 특성

	LTE plasmas	Non-LTE plasmas
Current name	Thermal plasmas	Cold plasmas
Properties	$T_e = T_h$ High electron density: $10^{21} - 10^{26} \text{ m}^{-3}$ Inelastic collisions between electrons and heavy particles create the plasma reactive species whereas elastic collisions heat the heavy particles (the electrons energy is thus consumed)	$T_e \gg T_h$ Lower electron density: $< 10^{19} \text{ m}^{-3}$ Inelastic collisions between electrons and heavy particles induce the plasma chemistry. Heavy particles are slightly heated by a few elastic collisions (that is why the electrons energy remains very high)
Examples	Arc plasma (core) $T_e = T_h \approx 10,000 \text{ K}$	Glow discharges $T_e \approx 10,000 - 100,000 \text{ K}$ $T_h \approx 300 - 1000 \text{ K}$

3. 상압 플라즈마 발생

플라즈마를 생성하기 위해 공급되는 에너지의 밀도는 국소열평형이든 아니든 간에 플라즈마의 상태에 많은 영향을 준다. 전반적으로는 밀도가 높은 에너지가 공급되면 전기아크와 같은 국소열평형 플라즈마가 생성되고, 보다 낮은 공급 에너지 밀도를 가지거나 펄스 형태로 에너지가 공급되는 경우에는 비국소열평형 플라즈마가 생성된다.

상압 플라즈마는 다음과 같은 두 영역으로 구분된다.

- 국소열평형 상태인 중앙 혹은 플라즈마 코어 영역
- 비국소열평형 상태인 주변 영역

상압 플라즈마 발생원들은 여기 모드에 따라 다음의 세 그룹으로 구분된다.

- 직류 및 저주파수
- 라디오주파수 파장으로 점화되는 플라즈마
- 마이크로파 방전

3.1. 직류 및 저주파 방전

직류 및 저주파수 방전은 디자인에 따라서 연속모드 또는 펄스모드로 작동할 수 있다.

펄스 작동모드는 큰 에너지를 방전에 주입할 수 있게 하지만 시스템의 위밍업은 제한된다. 달리 말하면, 펄스 전원은 기술적으로 직류전원보다 더 복잡하고 공정의 재생산성을 저해 시킨다.

■ 연속작동 모드 : 아크 플라즈마 토치

아크 플라즈마 토치는 직류 전원을 공급 받는다. 아크 플라즈마 토치는 전류보유(current-carrying)와 전류전달(transferred)아크의 두 카테고리로 나눌 수 있다. 이들은 다음으로 구성되어 있다.

- 전자가 방출되는 음극(cathode)
- 플라즈마 가스 주입 시스템
- 플라즈마 영역을 한정하는 노즐

전류보유 아크 토치에서는 양으로 극성화 된 노즐이 양극이 된다. 전류전달 아크 토치의 경우에는 다루어지는 물질이 양극이 되고, 노즐은 유동 포텐셜(floating potential)에 있게 된다.

아크는 음극과 양극 사이에서 점화되고, 플라즈마 가스를 이온화 한다. 플라즈마 응용을 가능하게 하는 중심부는 15000K 까지 변화한다. 아크 플라즈마는 매우 전도성이 뛰어난 매체이며, 가스는 이온화 정도가 매우 높고 전자밀도는 약 $3 \times 10^{23} \text{m}^{-3}$ 이다.

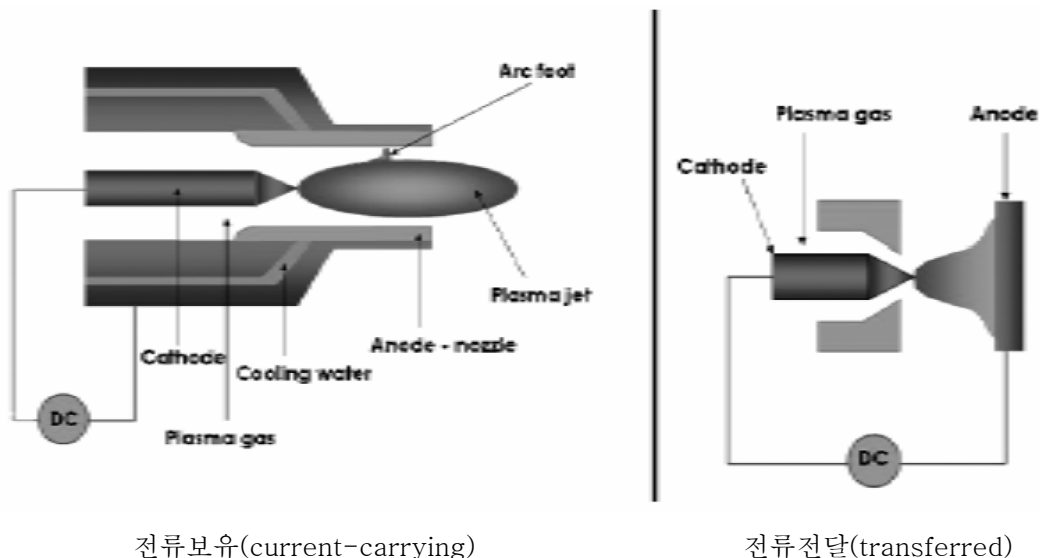


그림 4 아크플라즈마의 구조

■ 펄스작동 모드 : 코로나 방전

코로나는 약한 빛을 내는 방전인데 일반적으로 대기압에서 전기장이 충분히 큰 뾰족한 점, 모서리, 또는 얇은 전선등에서 나타난다. 따라서, 코로나 방전은 항상 불균일하며, 일반적으로 강한 전기장, 이온화 그리고 발광은 전극 근처에서 나타난다.

코로나 방전은 낮은 전류밀도를 갖는 비국소열평형 방전이다. 코로나 방전 장치는 음극선과 직류전원이 펄스로 들어오는 양극(처리할 표면)으로 구성되어 있다. 선에 음의 고압이 인가되면 방전은 음의 코로나가 된다. 이차적인 전자들이 플라즈마 내로 방출되고 선

으로 양의 이온들이 가속된다. 약 1eV 의 상대적으로 낮은 에너지를 가지는 전자들이 후미를 따르는 10eV 정도의 높은 에너지를 가지는 전자들의 이동선단부를 스트리머라고 한다. 이러한 고 에너지 전자와 무거운 입자들 사이에서 비탄성 충돌이 발생하며, 화학적으로 반응성이 있는 화학종을 생성한다.

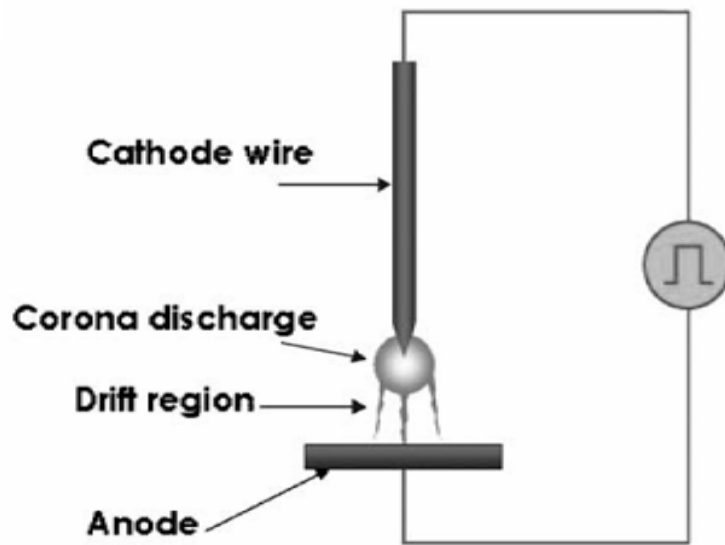


그림 5 코로나 방전의 구조

코로나 방전은 표면 처리나 가스 및 액체 분출 세정 등의 다양한 분야에 응용되고 있는 매우 유용한 도구이다. 이 방전은 고밀도의 반응성 원자와 활성종을 상압 상태에서 가스를 가열하지 않고 만들어낼 수 있는데 이러한 특성으로 인해 일반 가스 상태에서는 얻을 수 없는 여러 유용한 성질을 가질 수 있다.

플라즈마의 체적이 매우 작기 때문에 표면 처리와 관련한 코로나 방전의 단점으로는 처리할 수 있는 면적의 크기가 작다는 것이다. 처리 표면을 늘리기 위하여 음극선은 평면형의 전극으로 대체될 수 있다. 이러한 시스템은 전극 사이의 간격에 수직한 스트리머인 마이크로 아크를 생성한다. 스트리머는 물질 표면에 비균질 처리를 야기하면서 항상 같은 장소인 표면에서 시작된다. 이러한 문제를 피하기 위하여 유전체 장벽 방전(dielectric barrier discharge)이 발전되었다.

■ 유전체 장벽 방전(dielectric barrier discharge)

유전체 장벽은 대기압에서 아주 큰 비-평형 조건에서 동작하고, 고 출력 방전을 할 수 있으며 복잡한 펄스 전력 공급기가 없어도 되기 때문에 산업체에서 널리 이용되고 있는데, 오존 발생, 이산화탄소 레이저, 자외선 광원, 오염물질 처리 등에 널리 응용되고 있다. 특히, 유전체 장벽은 물질 표면을 처리하는데 널리 이용되고 있으며 이러한 표면 처리를 통해서 인쇄나 접착 특성이 더 좋은 표면을 만들 수 있다. 유전체 장벽은 대기압과 상온에서 방전 가능하기 때문에 물질 표면 처리의 경우 거의 모든 처리가 유전체 장벽 방전을

통해 이루어지고 있다.

그림 6 과 같이 DBD(dielectric barrier discharge) 장치는 두 개의 평행한 금속 전극으로 구성되어 있다. 최소한 전극 중 하나는 유전체 층으로 덮여있다. 절연체를 사용하게 되면 직류 전력의 경우 전극을 통한 전류의 흐름이 불가능하므로 교류(AC) 전력을 이용하여 플라즈마를 발생한다. 안정적인 플라즈마 작동을 보장하기 위하여 전극을 분리하는 간격은 수 밀리미터로 제한되며 플라즈마 가스는 이 간격 사이로 흘러간다. 유전체 장벽 방전은 국부적으로 과동이나 잡음을 일으키는 불꽃이 존재하지 않기 때문에 조용한 방전이라고 부르기도 한다. 방전은 사인함수 혹은 펄스 형의 전원으로 점화된다. 작동 가스의 조성, 전압 그리고 여기 주파수에 따라 방전은 필라멘트 형태 혹은 글로우 형태가 된다. 필라멘트 형태의 방전은 유전체 층의 표면에서 발달하는 마이크로 방전 또는 스트리머에 의해 만들어진다. 플라즈마 가스로 헬륨을 사용하면 고 에너지의 준안정성 헬륨 화학종으로 인해 글로우 방전으로 발전된다.

유전체 층은 다음에 의해 중요한 역할을 하게 된다.

- 방전 전류를 차단하고 아크로의 전이를 피할 수 있게 하여 연속 또는 펄스모드에서 작업이 가능하게 함
- 전극 표면에 무작위로 스트리머를 배분하고 균질한 표면처리를 보장하다. 스트리머의 생성은 유전체 표면에 전자의 축적으로 인해서 발생한다.

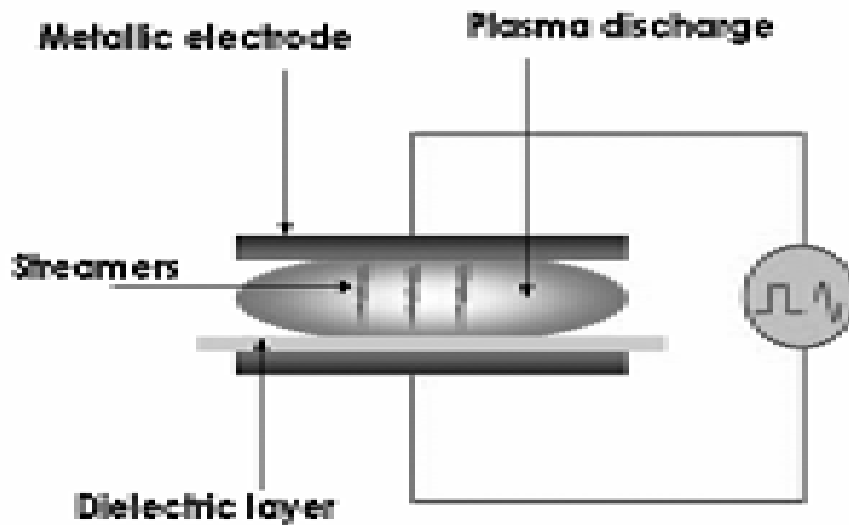


그림 6 DBD(dielectric barrier discharge) 의 구조

3.2. RF 방전

구조를 고려할 때, RF 전원은 고에너지 혹은 저 에너지 공급과 함께 작동 가능하다. 이는 플라즈마 물성치에 영향을 주며 응용 가능성에도 영향을 준다.

■ 고 에너지 방전 : RF 플라즈마 토치

그림 7 와 같이 설계될 수 있다. 플라즈마는 RF 전원이 공급되는 나선형의 코일에 의해 시작되고 유지된다. 이러한 종류의 토치는 현재 매우 잘 발달되어 있으며, 분광 분석이나 독성 폐기물 처리 등에 사용될 수 있다.

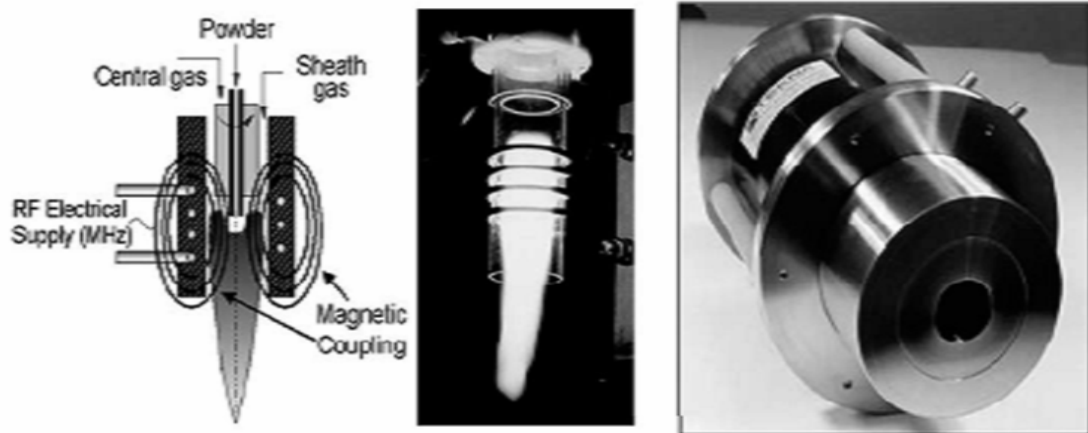


그림 7 RF plasma torch

■ 저 에너지 방전 : 상압 플라즈마 제트

APPJ(atmospheric pressure plasma jet)는 길이 20cm 이하로서 저 에너지에 작동하는 작은 RF 플라즈마이다.

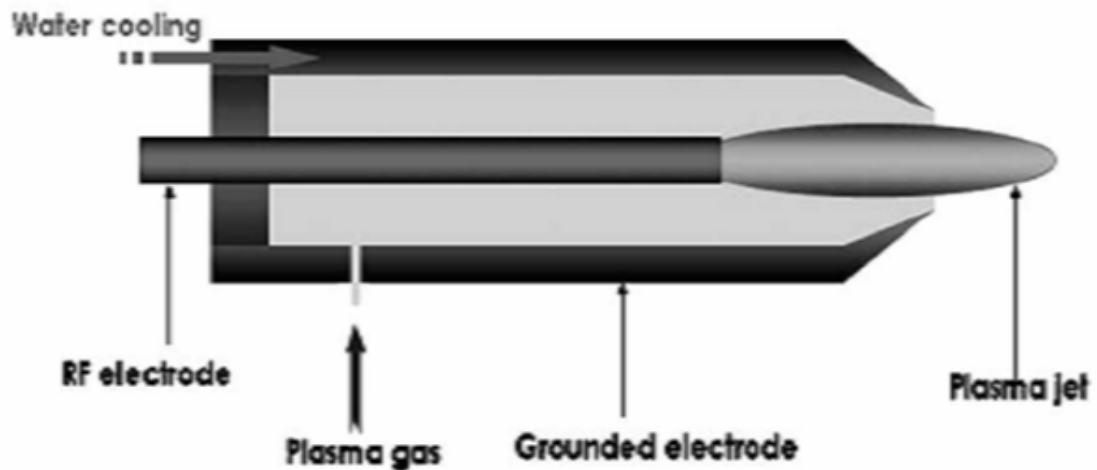


그림 8 APPJ(atmospheric pressure plasma jet)

■ 저온 플라즈마 토치

저온 플라즈마 토치는 DBD와 APPJ 구조 사이에 놓여있다.

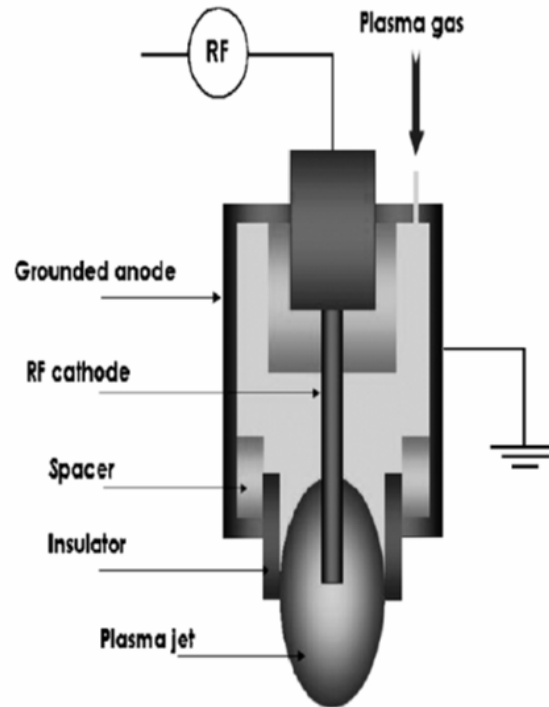


그림 9 저온 플라즈마 토치

■ 중공 음극 시스템

RF 연필(pencil)은 저온 플라즈마 토치에 매우 근접한다.

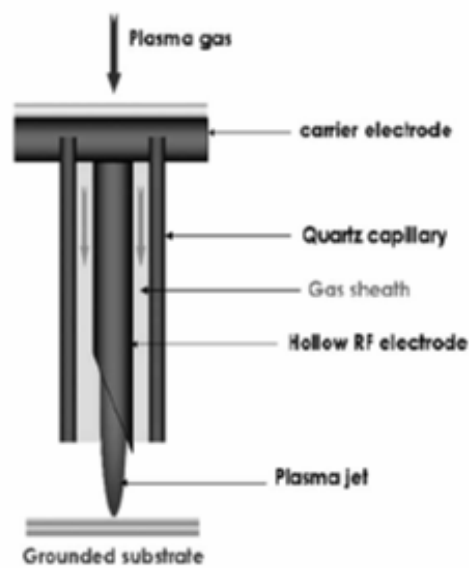


그림 10 RF pencil design