

플라즈마란?

우리주변의 플라즈마

얼음에 열을 가하면 0°C에 이른 뒤에 물이 되고, 더욱 온도를 올려 100°C에 이르면 물은 끓어서 수증기가 된다. 이와 같이 물질에 열을 가하면 고체-액체-기체로 상 전이를 일으켜 물질의 상태가 변화한다는 것은 잘 알려져 있다. 이들 기본적인 세 가지 물질상태를 물질의 3태라한다. 그럼 여기서 가열되는 온도를 더욱 증가시켜 수천도 이상이 되면 물질은 어떻게 될까? 물질은 기체 상태를 지나 그 속의 기체분자들끼리 격렬하게 충돌하여 이온화가 일어나서 다수의 양이온과 전자가 발생하고 이것들이 움직여 떠돌아다니는 상태에 이르게 된다. 예를 들어 촛불의 불꽃 속의 일부라던가 로켓추진 불꽃, 번개, 형광등, 태양에서는 이와 같은 물질상태가 유지되고 있다. 이 상태를 물질의 제 4의 상태, 즉 플라즈마라 부른다. 기체분자나 원자가 이온화될 때 양이온과 전자는 반드시 쌍으로 발생하므로 플라즈마 안의 양이온의 수와 전자의 수는 거의 같아서 전체적으로 전기적인 준 중성(quasi-neutral)상태를 유지한다고 할 수 있다. 다시 말해 이온과 전자의 밀도가 거의 같게 이온화된 상태의 기체를 플라즈마라고 정의 할 수 있다.

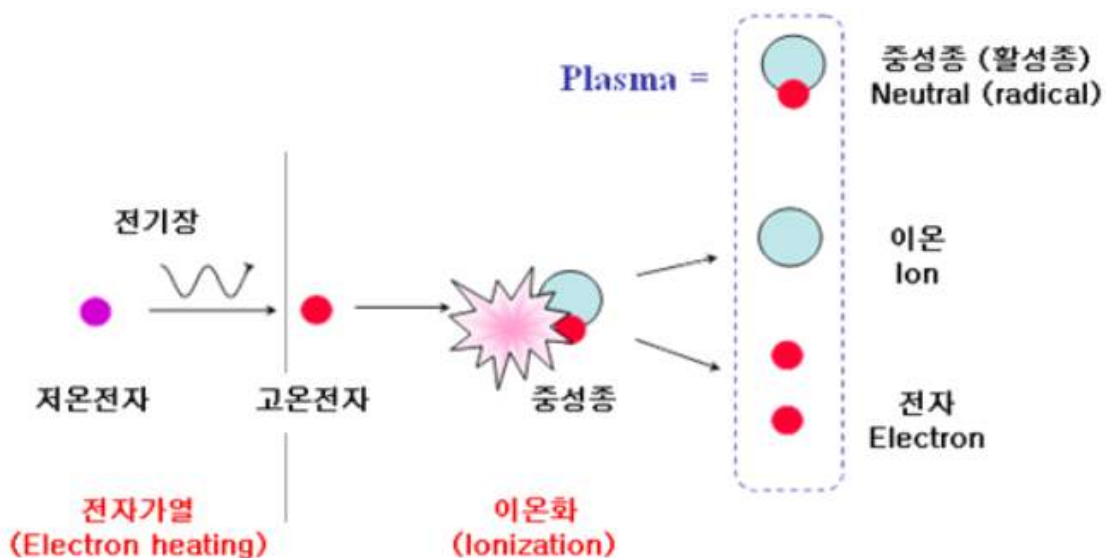


그림 1. 플라즈마의 생성

일반적으로 공정플라즈마 안에서는 주로 전자, 양이온, 중성입자(원자나 분자, 라디칼과 같이 전하를 갖지 않는 입자) 등의 세 종류의 입자가 존재한다. 각각의 밀도를 n_e , n_i , n_n 이라 하면 $n_e \cong n_i$ (준중성)이고, 이온화하기 전의 기체분자의 밀도는 n_e+n_n 이다. 여기서, 어느 정도 이온화되어 있는가를 나타내는 기준 값으로 이온화율(전리도) $\beta = n_e / (n_e + n_n)$ 라 정의한다. 태양의 코로나나 핵융합로의 고온 플라즈마에서는 100% 이온화되어 있으며, 이 경우 $\beta=1$ 인 플라즈마가 형성된다. 이를 완전 이온화(전리) 플라즈마라 한다. 한편, 수% 이상 이온화되어 있을 때 ($\beta \geq 10^{-2}$)를 고밀도 플라즈마, 불꽃 중의 플라즈마와 같이 대부분이 중성입자의 겨우($\beta < 10^{-3}$)를 이온화도가 약한 저밀도(약전리) 플라즈마라고 하며 대부분 공정 플라즈마는 저밀도에서 고밀도 플라즈마를 포함한다.

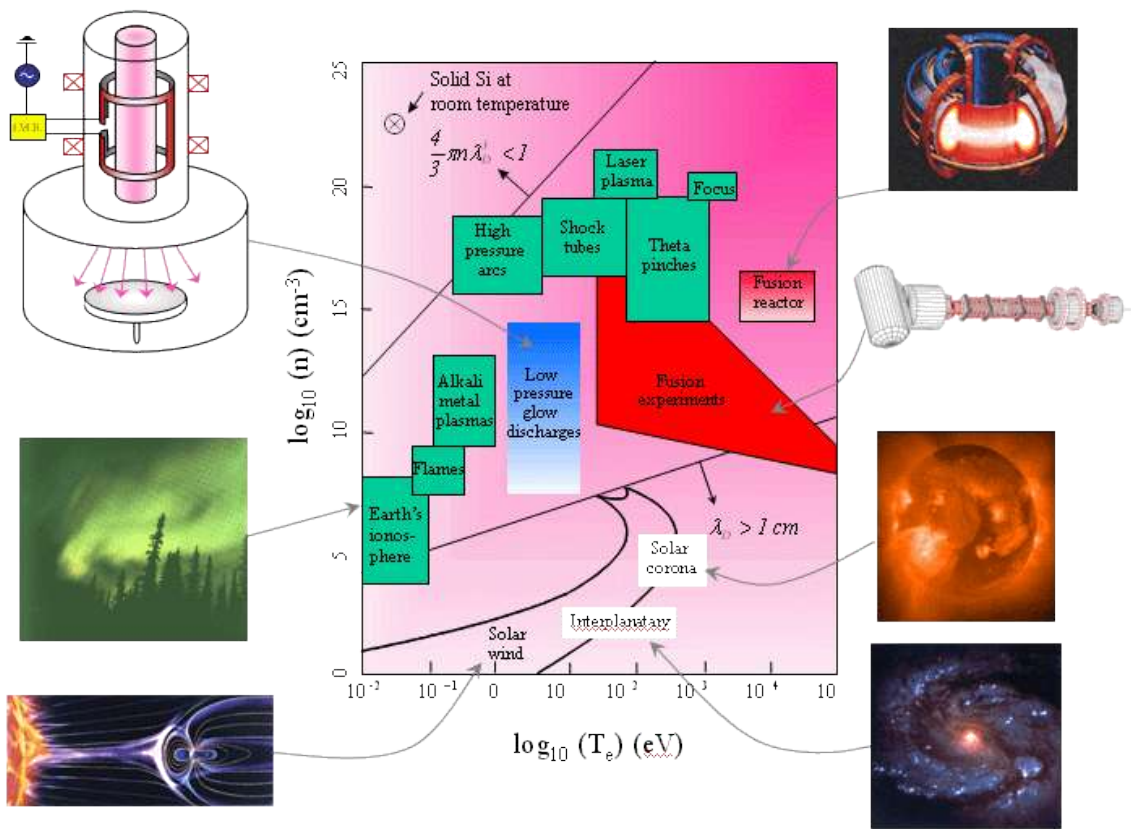


그림 1. 여러 가지 플라즈마 현상 및 플라즈마의 밀도와 온도

대기압에 가까운 고기압에서 방전을 하면, 전자와 이온, 중성입자간의 충돌이 격렬해지며 입자간의 운동에너지 교환이 충분히 이루어져서 열평형상태가 된다. 전자,

이온, 중성입자의 온도를 각각 T_e , T_i , T_n 이라 했을 때, 이들 세 종류의 입자온도가 거의 같아지는데, ($T_e \cong T_i \cong T_n$) 이와 같은 열평형 플라즈마를 열 플라즈마(thermal plasma)라 한다. 실제로 열 플라즈마를 발생시킬 때에는 대량의 가스를 흘리면서 음극과 양극사이에 아크 방전을 시켜 제트 상태로 플라즈마가 뿜어져 나오게 한다. 이것을 플라즈마 제트(plasma jet) 또는 플라즈마 토치(plasma torch)라 한다.

한편 수백 Pa 이하의 낮은 압력의 플라즈마는 열적으로 비평형상태가 된다. 즉, 전자는 충돌에 의해 그다지 많은 운동 에너지를 잃지 않으므로 $T_e \gg T_i, T_n$ 이 된다. 이와 같은 플라즈마를 저온 플라즈마(cold plasma)라 한다. 따라서 높은 압력에서라도 열적 평형이 형성되기 전의 짧은 펄스 플라즈마가 반복해서 생성되는 방전모드의 경우에도 저온 플라즈마의 형성이 가능하다. 저온 플라즈마는 공업적으로 가장 널리 이용되고 있다.

플라즈마의 여러 가지 성질

물질의 제 4상태인 플라즈마는 물리 및 화학적으로 특이한 성질을 갖고 있다. 첫째, 플라즈마는 고온이기 때문에 입자의 운동에너지가 매우 크다. 둘째, 전하를 갖는 입자들의 집단이기 때문에 전도성이 높아 금속처럼 전기를 잘 통한다. 셋째, 화학적으로 활성화시켜 반응성을 높일 수 있다. 또한 플라즈마는 빛을 발하기 때문에 네온 사인과 같이 광원으로도 이용할 수 있다. 이와 같은 플라즈마의 성질은 어디에서 나오는 걸까? 이것은 플라즈마 안에서 전자와 기체분자와의 충돌에서 구할 수 있다. 분자 XY에 전자 e가 충돌하는 경우, 충돌 에너지가 작을 때는 탄성충돌이 일어나며, 전자의 운동에너지는 거의 변하지 않는다. 그러나 충돌에너지가 커짐에 따라 비탄성충돌을 하게 된다. 예를 들어, 분자 내의 핵 주위를 돌고 있는 궤도전자가 충돌할 때 에너지를 얻고, 그 결과 궤도전자는 에너지준위가 큰 상부의 궤도를 돌게 된다(여기현상). 이와 같이 높은 에너지 상태의 분자를 여기분자라 부르며 XY^* 로 나타낸다. 일단 여기상태의 궤도에 오른 전자는 단시간 내에 낮은 에너지준위의 궤도로 떨어지므로, 그 때 남은 에너지가 빛으로 방출된 것이다(발광반응). 한편, 충돌하는 전자의 에너지가 전자의 구속에너지 보다 높게 되면 분자내의 전자 e가 밖으로 빠져 나오게 되어 이온화가 일어난다(이온화 반응). 또한 분자 XY의 결합이 끊어져, X와 Y로 분리되는 경우도 있다(해리반응). 결합에 관여하는 전자쌍을 :로 표시하면 해리는 $X:Y \rightarrow X \cdot + Y \cdot$ 로 쓸 수 있다. 이와 같이 X와 Y는 결합되지 않은 전자를 갖고 있기 때문에 화학반응을 일으키기 쉽다. 이를 화학활성종 또는 라디칼(radical)이라 부른다. 예를 들어 H, O, Cl 등과 같이 해리된(유리원자)나 CH_3 ,

CF₂, SiH₃ 등의 분자들은 라디칼이다. 전하를 갖고 있지 않는 것을 강조할 때는 중성 라디칼이라고도 하고, 이것이 이온화된 형태의 이온성 라디칼(X⁺, Y⁺)과 구별하는 경우도 있다.

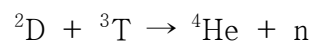
표 1. 플라즈마의 성질 및 응용

플라즈마 내의 중요한 충돌과정	플라즈마의 성질과 응용
여 기: $XY + e \rightarrow XY^* + e$ 탈여기: $XY^* \rightarrow XY + h\nu$ (광자) 해 리: $XY + e \rightarrow X + Y + e$ 전 리: $XY + e \rightarrow XY^+ + 2e$ $X^+ + Y + 2e$	발광성 (광학적 응용) 반응성 (화학적 응용) 전도성 (전기적 응용)
전계에 의한 전자, 이온의 가속 입자 사이의 충돌에 의한 열화, 고체표면과의 충돌	고속입자 (역학적 응용) 고온 (열적 응용)

플라즈마의 다양한 응용

플라즈마는 우리 생활의 다양한 부분에서 응용되고 있고 그 중요성이 점점 높아져 가고 있다. 그림 3은 플라즈마의 이용을 전통적으로 에너지 분야, 물질 및 재료분야, 환경 및 우주분야의 세 가지로 분류하여 나타낸 것이다.

먼저 에너지 분야에서는 초고밀도, 초고온 플라즈마를 형성하여 핵융합반응을 일으켜 발전을 하고자하는 핵융합로가 주목받고 있다. 화석연료는 가까운 장래에 확실히 고갈될 것일 뿐 아니라 그 연소에서 발생하는 이산화탄소에 의한 지구 온난화는 심각한 환경문제로 대두되고 있다. 한편 핵분열반응에 의한 원자력발전의 원료인 우라늄도 유한한 것이며 원자로의 안정성과 방사선 핵폐기물의 처리가 문제시되고 있다. 이와 같은 상황에서 핵융합발전이 실현된다면 인류는 바닷물 중에 함유된 수소동위원소를 연료로 하여 반영구적으로 깨끗한 에너지를 확보하게 되는 것이다. 핵융합의 원리는 다음과 같다. 중수소(D)와 삼중수소(T)가 높은 에너지로 충돌하면, 2개의 원자핵이 융합하여 헬륨으로 변하고 중성자(n)가 나온다. 즉 다음과 같은 핵반응이 일어나



그때 발생하는 질량결손(0.019amu)이 He과 n의 막대한 운동에너지가 되어 방출된다. 핵융합으로 발생된 중성자를 핵융합로 주위의 흡수매질에서 흡수하여 증기에너

지로 바꾸고 이를 이용하여 터빈을 돌려 전기에너지로 발전을 한다.

높은 압력의 아크 플라즈마는 방대한 열원이 되므로 세라믹이나 금속 등의 미립자를 흡입시켜 단시간에 용해할 수 있다. 이것을 이용하여 용사, 제련, 표면개질, 미립자제조 등에 활용하고 있다. 한편 플라즈마의 화학반응성을 이용하여 박막성장이나 식각을 하는 기술은 첨단소자제조에 필수 불가결한 것이라 한다. 원료가스를 주입하고 방전하면 높은 에너지의 전자가 가스분자와 충돌하고 분해되어 화학적으로 활성화된 라디칼 종을 다량으로 만든다. 이 라디칼을 차례대로 기판표면에 흡착하여 라디칼끼리 결합하는 표면화학반응이 진행되어 새로운 화학구조를 갖는 박막이 성장한다. 이것을 플라즈마 화학기상증착(chemical vapor deposition, CVD)라 한다. 또한 금속 등의 고체원료를 전자빔 증발법을 이용하여 플라즈마 속으로 증발/주입하면 전리되어 이온이 만들어지고 이것을 기판으로 가속하여 표면을 개질하거나 박막을 형성시킬 수 있다. 이런 방법을 이온 플레이팅(ion plating)이라 한다. 한편 기판에 도달한 라디칼이 기판원자와 직접 반응을 일으키고 휘발성 기체가 되어 표면으로부터 점차 이탈함으로써 점진적으로 기판표면이 깎여 나가 식각이 일어나게 된다. 이와 동시에 플라즈마 내의 이온을 가속시켜 기판에 조사하면 이온이 부딪친 면의 식각반응은 촉진되어 방향성 있는 에칭이 가능하게 된다. 이와 같은 방법을 반응성 이온에칭(reactive ion etching, RIE)라 부른다. 이온을 수백 eV이상의 높은 에너지로 가속하여 고체재료에 충돌시키면, 재료를 구성하는 원자가 밖으로 튕겨져 나오는 현상 즉 스퍼터링(sputtering)이 일어난다. 이와 같은 방법으로 스퍼터링된 입자를 따로 기판 상에 퇴적시켜 박막을 만드는 방법도 널리 활용되고 있다.

플라즈마를 이용하는 박막공정은 통상의 액체를 이용하는 습식화학반응공정에 비하여 여러 가지 이점이 있다. 첫째, 기체를 이용하는 건식공정이기 때문에 폐액처리가 필요하지 않고 배기가스처리 등의 공해 대책이 용이하다. 둘째, 액체를 이용하는 습식공정과 같이 반응용기를 가열하여 고온으로 할 필요가 없고 저온에서 높은 반응속도를 얻을 수 있다. 왜냐하면 플라즈마내의 고에너지 전자가 가스를 분해하여 활성종을 대량으로 만들 수 있기 때문이다. 셋째, 식각을 할 때 습식공정에서는 액체가 기판에 접촉하는 곳부터 등방적(isotropic)으로 에칭이 진행되는데 반하여, 반응성 이온에칭에서는 이온조사의 방향에 따라 이방성(anisotropic) 에칭이 가능하다. 이것은 특히 높은 정밀도의 가공을 필요로 하는 전자소자제작에 적합하다.

마지막으로 환경 및 우주 분야로, 최근에 플라즈마를 지구환경보전에 이용하고자 하는 기대가 높아지고 있다. 도시 쓰레기처리, 금속 폐기물의 정련, 연소 후 발생하는 유해가스나 유기용매의 처리 등에 플라즈마를 이용하는 연구가 진행되고 있다. 이때, 처리속도나 비용 등이 고려되어 진공상태에서 방전하는 방식보다는 대기압에서

열 플라즈마 또는 코로나 방전 등의 방법이 이용되고 있다.

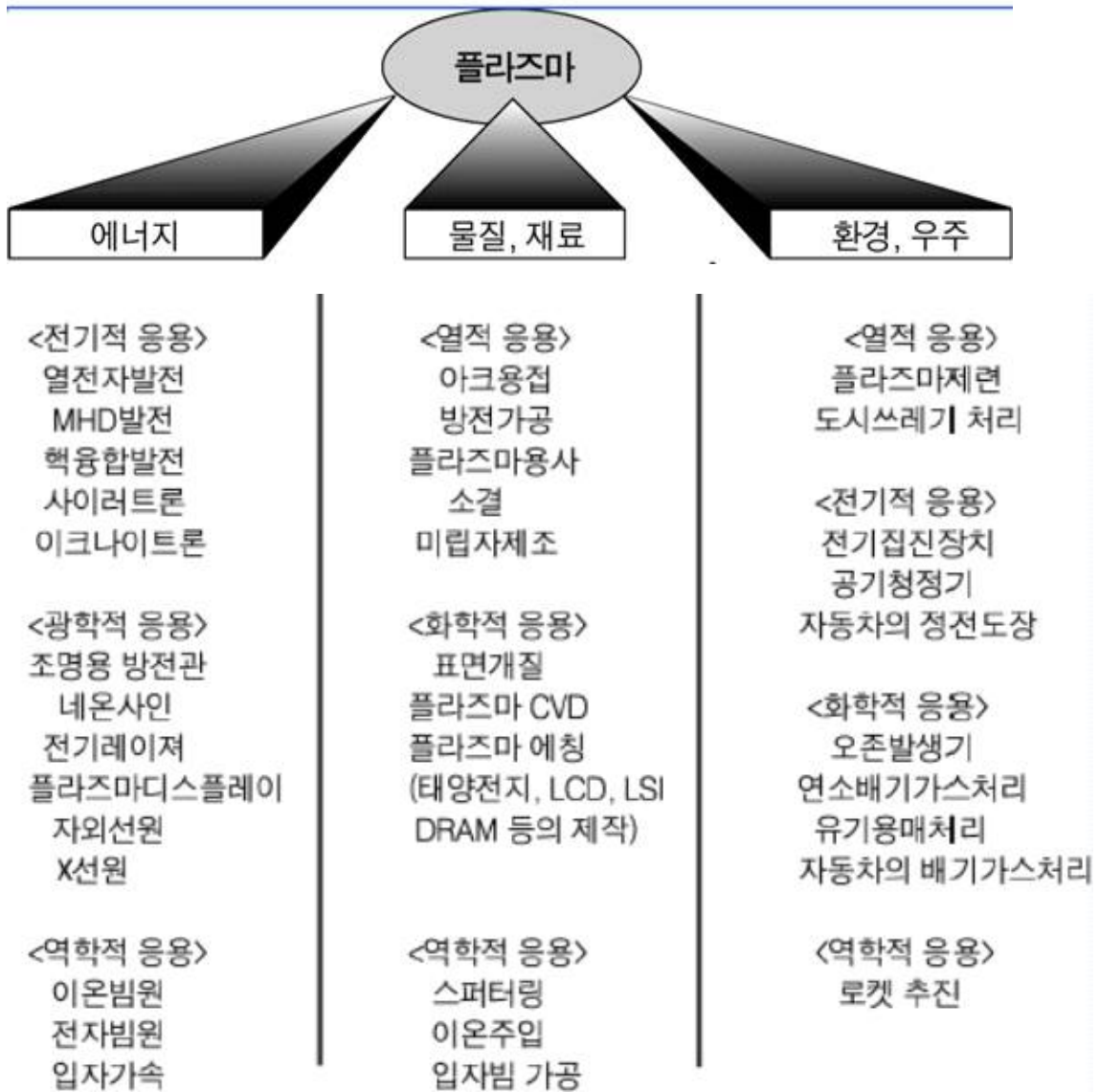


그림 3. 플라즈마의 응용

참고문헌: 플라즈마 일렉트로닉스 (교학사)