

상압 플라즈마의 응용 현황



나 종 주

(KIMM 재료공정연구부)

- '82 - '86 서울대학교 금속공학과 (학사)
- '86 - '88 한국과학기술원 재료공학과 (석사)
- '88 - '91 LG전선 연구소
- '91 - '97 한국과학기술원 재료공학과 (박사)
- '97 - 현재 한국기계연구원 선임연구원



이 구 현

(KIMM 재료공정연구부)

- '70 - '74 동아대학교 금속공학과 (공학사)
- '80 - '83 동아대학교 금속공학과 (공학석사)
- '74 - '79 국방부 조병창 근무
- '80 - 현재 한국기계연구원 책임연구원



이 상 로

(KIMM 재료공정연구부)

- '72 - '79 서울대학교 금속공학과 (학사)
- '78 - '81 (주) 삼미사
- '81 - '83 한국기계연구원 제조야금실
- '83 - '85 Stevens Institute of Technology 재료공학과 (석사)
- '85 - '89 Stevens Institute of Technology 재료공학과 (박사)
- '89 - 현재 한국기계연구원 책임연구원

1. 서론

박막코팅기술은 습식방법(wet process)과 건식방법(dry process)으로 크게 나눌 수 있다. 다시 건식방법은 물리증착법(PVD)과 화학증착법(CVD)으로 분류되며 이러한 증착기술은 이미 반도체 소자제조에 오래전부터 활용되어 왔고 보호피막을 코팅하여 재료의 수명과 성능을 향상시키기 위한 기술로서도 널리 이용되고 있다. 특히 물리증착법은 모두 플라즈마(plasma)를 이용하고 있다. 플라즈마란 물질의 제4의 상태로 고체, 액체, 기체상태와 구별된다. 플라즈마는 중성 가스 원자, 양이온과 전자로 구성되어 있고 전체적으로는 중성을 나타낸다. 물리 증착법에서 사용되는 플라즈마는 주로 저온 플라즈마(cold plasma)로서 중성인 원자와 이온의 운동 에너지가 비교적 작아 이들의 운동 에너지를 온도로 환산하면 500K 정도이다.

일반적으로 저온 플라즈마는 진공중에서만 생성될 수 있는 것으로 알려져 왔다. 저온 플라즈마를 사용하여 금속, 세라믹, 폴리머등의 증착, 표면처리, 폐기가스 정화등 그 응용 분야의 다양함과 청정공정이라는 장점에도 불구하고 진공에서만 사용될 수 있기 때문에 진공을 만들기 위한 부대장치가 필요하다. 진공장비의 가격은 매우 높아 경제적인 측면에서 저온 플라즈마의 사용이 제한되어 왔다. 이에 대해 상압에서 플라즈마를 형성하려는 노력은 일찍부터 시작되었다. Von Engel등^[1]은 1933년에 상압에서 H₂ 플라즈마를 형성할 수 있었다고 보고하였다. 그러나 이 방법으로는 전극의 온도가 너무 상승하게 되어 전극의 냉각이 필요하였고 안정된 플라즈

마를 얻기 어려웠다. 그 후 계속된 연구결과에 의해 최근 미국과 일본등지에서 전극의 설계, 전원 공급 장치의 고안 및 플라즈마를 안정화시키기 위한 dilute gas등을 개발하여 안정된 상압 플라즈마를 얻었다는 보고와 더불어 이 상압 플라즈마를 이용하여 다이아몬드 박막의 증착, SO₂, NO_x 가스등을 분해하는 장치, 오존 발생 장치, 플라스틱의 표면처리등을 행하고 있음을 보고하고 있다.

국내에서도 이러한 상압 플라즈마를 이용하여 항공기 부품에 플라즈마 용사를 통한 코팅, LG 전선에서 전선 피복의 표면처리와 기계연구원에서 연구되고 있는 코로나 방전을 이용한 탈황/탈질 시스템^[2]등에 적용하고 있는 실정이다. 반면에 박막코팅기술은 아직도 진공에서 저온 플라즈마를 이용하여 각종 물질을 증착하고 표면 처리를 하고 있다.

2. 연구배경

방전은 절연체인 매질(media)이나 장치(device)를 통해 전류가 흐르는 현상을 일컫는다. 절연체의 양단에 임계값 이상의 전기장(electric field)이 걸리면 절연체(insulator)는 전도체(conductor)로 변하게 되는데 이를 break-down이라고 부른다. 전기 부품에서 이같은 break-down이 일어나면 부품이 망가지게 되지만 오히려 이러한 break-down 현상을 이용하는 경우도 많다. 예를 들면 용접을 할 때 절연체 매질인 공기의 양단에 전극(용접봉과 용접할 물체)을 형성하여 전압을 가하면 아아크(arc)가 발생하여 용접봉과 피용접체의 용접 부위를 녹여 서로 붙을 수 있도록 할 수 있다. 진공도 매우 뛰어난 절연성을 가지고 있다. 하지만 진공중에 있는 전극의 양단에 임계 전압(break-down voltage) 이상을 가하면 진공중의 불활성 가스들이 플라즈마를 형성함으로써 전도성을 띠게 된다. 따라서 플라즈마의 양단에 전압을 인가하면 전자와 양이온이 서로 반대 방향으로 이동하여

전류의 흐름을 야기시킬 수 있다. 하지만 계속 전자와 양이온이 공급되지 못하면 플라즈마 상태를 유지할 수 없다. 플라즈마를 유지하기 위하여 전극의 양단에 전압을 가해 주어야 하는데 이때의 전압은 임계 전압보다는 낮다. 전극의 온도, 형상, 진공의 압력등에 따라 유지되는 플라즈마는 여러 가지로 분류될 수 있다. 이 중에서 가장 많이 쓰이는 플라즈마는 글로우 방전(glow discharge)과 아이크 방전(arc discharge)이다. 글로우 방전^[3]은 전극의 양단에 150~450V의 전압을 가하여 플라즈마내의 양이온이 음극으로 가속되어 날아와 음극과 충돌할 때 발생하는 2차 전자가 플라즈마내로 가속되어 가면서 중성 가스를 이온화시켜 양이온과 전자를 만들고 이렇게 만들어진 전자가 다시 중성가스를 이온화시키는 과정을 반복함으로써 급격하게 전자의 밀도가 증가하게 되어 전극의 양단을 통해 양이온과 전자가 소멸되어도 일정한 양이온과 전자의 농도를 유지시킬 수 있게 된다. 이때에는 음극의 전체에서 2차 전자가 발생하므로 음극이 녹을 만큼 온도가 상승하지는 않는다. 음극에 타겟(target)을 놓으면 타겟 물질을 스퍼터링(sputtering)하여 양극이나 접지된 전극에 놓인 기판에 증착할 수 있으며 음극에 표면처리할 재료를 놓으면 재료의 형상에 무관하게 균일한 이온 충격을 통하여 표면 처리 효과를 얻을 수 있다. 그리고 플라즈마를 형성하는 불활성 가스의 종류를 변화시켜 다양한 효과를 얻을 수 있다. 반면에 아아크 방전^[4]은 아아크가 발생된 후에는 전극의 양단에 10~수십 V의 낮은 전압을 인가한 상태에서 지속적으로 플라즈마를 유지할 수 있다. 아아크는 단면적이 매우 작고 전류밀도가 높은 플라즈마 column을 형성하는데 이 column의 온도는 수천도이상이어서 전극에 닿으면 전극 표면을 녹일 수 있게 된다. 전극의 표면이 녹으면 분화구와 같은 흔적을 남겨 놓게 되는데 직경이 수 μ m~수백 μ m정도이다. 이같이 음극의 매우 국부적인 부분에서만 물질이 녹기 때문에 음극 전체의 온도는 비교적 낮을 수가

있다. 음극의 국부적인 부분에서 녹을 정도로 온도가 높아지면 그부분에서 열전자 방출(thermionic emission of electrons)이 일어난다. 이 열전자가 좁은 영역에 집중됨으로써 plasma 밀도를 증가시킬 수 있게 되고 전자와 이온은 서로 반대 방향으로 가속되지만 아주 짧은 시간 동안에는 이온의 무게에 비해 전자의 무게가 1000배 이상 가벼우므로 이온에 비해 빨리 확산해 나간다. 이때 전자가 확산해 나감으로 인해 양의 공간전하(positive space charge)가 생성되어 전자가 무한정 확산해 나가지 못하도록 전기장이 형성된다. 따라서 음극 앞에는 큰 양의 전기장이 걸리게 되어 음극에서 전자의 전계 방출(field emission of electrons)이 일어난다. 이와 같이 아아크 방전에서는 글로우 방전에서 없었던 2가지 전자의 발생원이 더 작용함으로써 저전압, 대전류를 형성할 수 있게 된다. 일반적으로 압력이 증가하면 글로우 방전 영역에서 아아크 방전 영역으로 전이된다. 이러한 이유로 상압에서 플라즈마를 이용하는 장치들은 대부분 아아크 방전을 이용한 것이 많다. 하지만 최근에는 글로우 방전에서 아아크 방전로의 전이를 억제하는 방안을 마련하여 글로우 방전을 이용하려는 경향이 증가하고 있다. 이것은 아아크 방전의 단점인 좁은 영역의 플라즈마와 방향성을 극복하기 위한 노력의 일환이다.

3. 상압 플라즈마 개발 현황

일본의 Yokoyama 등^[5]은 전극 사이에 유전체를 삽입하여 아크의 발생과 전극의 온도 상승을 억제하였으며 고주파 전원 공급 장치(50~1kHz)를 이용하여 플라즈마를 계속 발생시킬 수 있도록 하였고 Ar 가스에 He 가스(또는 ketone or Methane gas)를 미량 첨가하여 플라즈마의 안정화를 꾀했다. 이때 전극에 가해지는 전압은 6.9~8.4kV였다. 이 장치를 이용하여 오존을 발생시키는 실험을 행하였으며 기존의 silent electric discharge를 이용한 오존 발생 장치에 비해 뛰어

난 효율을 보이고 있음을 보고하였다. 그 후 Kogoma 등^[6]은 전극으로서 금속망(metal mesh)를 이용하여 이 장치를 개량하여 더욱 오존 발생 효율을 높일 수 있었음을 보고하고 있다.

러시아의 Akishev 등^[7]은 상압 플라즈마에서 생성되는 각종 라디칼(radical)과 이온 및 전자의 에너지를 계산하였으며 평판에 일정하게 배열된 핀에 저항을 연결한 형태의 전극을 고안하였으며 이 장치를 통하여 상압 플라즈마를 생성시킬 수 있었다. 그리고 이 장치를 사용하여 수분과 암모니아, NOx, SOy 등의 분해 조건을 계산한 결과와 실험치를 비교하여 보고하고 있다.

미국의 LLNL(Lawrence Livermore National Laboratory)^[8]에서는 "Pulsed Streamer Coronas"를 개발하여 상압에서 중성 가스의 온도는 낮지만 매우 반응성이 뛰어나고 온도가 높은 전자를 형성하는 플라즈마를 발생할 수 있었다. 이 장치는 일반적인 상압 플라즈마보다 더 낮은 전력을 사용한다. 이 장치의 주된 응용 분야는 플라스틱의 표면처리이다. 특히 자동차 범퍼에 사용되는 폴리프로필렌(Polypropylene)의 표면처리에 제일 적합한 것으로 보고하고 있다. 폴리프로필렌(Polypropylene)은 기존의 범퍼 재료로 사용되고 있던 우레탄(Urethane)보다 싸고 가볍기 때문에 최근 자동차 범퍼로 사용하기 위하여 많은 연구가 진행되고 있다. 그러나 폴리프로필렌의 분자구조 때문에 페인트가 잘 벗겨지는 문제가 이 재료의 사용에 제일 큰 문제점이었던. 이 문제를 해결하기 위하여 먼저 트리클로로에탄(trichloroethane)으로 표면을 세척한 후 특별한 primer를 바른 후에 마지막으로 페인트칠을 하였다. 이 방법은 많은 primer와 용매를 사용하여 하고 오존층을 파괴하는 트리클로로에탄(trichloroethane)을 사용해야 하기 때문에 비경제적이고 환경 친화적이지 못하다. 이 외에도 0.5Torr의 입력에서 극초단파 플라즈마(microwave plasma)에 의해 발생되는 라디칼을 이용하여 표면 개질을 하기 때문에 큰 챔버와 진공 펌프등을 사용해야 하는 저압 극초단파 방전

(micromave discharge)을 이용한 플라즈마 처리법을 사용하기도 한다. 그러나 이 방법은 비경제적이다. 비열적 플라즈마(Non-thermal plasma) 방법이 성공하기 위한 열쇠는 전기 에너지가 가스를 가열하는데 쓰이지 않고 대부분 전자의 에너지를 높이는데 쓰이는 방전을 형성하는데 있다. 이들 고에너지의 전자는 플라스틱 표면의 화학구조를 개질하는 라디칼을 형성할 수 있다. 이같은 요구는 스트리머 코로나 방전(streamer corona discharge)를 사용하여 충족될 수 있다. 스트리머는 매우 집중된 공간전하파에 의해 형성된 플라즈마 필라멘트(plasma filaments)로 볼 수 있다. 이들 공간전하파(space-charge wave)는 이 고전기장에서 전자의 쇄도에 의해 파(wave)의 정면에 전기장을 형성시키며 전파되어 간다. 스트리머 방전은 에너지 효율을 크게 향상시킬 수 있다. 이것은 스트리머의 짧은 존속기간(lifetime) 동안에 이온들은 거의 움직이지 못하므로 이온들에 의한 에너지 소비가 없기 때문이다. 이같은 스트리머의 짧은 존속기간은 매우 짧은 고전압 펄스(high-voltage pulse)를 사용하여 얻을 수 있다. 이 방법은 상압에서 사용할 수 있기 때문에 비싼 진공 장비가 필요없다. 그리고 가스의 가열없이 공급된 전기 에너지를 이용하기 때문에 동작하는데 적은 전력이 소모된다. 그리고 이 기술은 완전히 건식이므로 유해한 화학물질이 필요없다.

Stanford대학^[9]에서는 상압 플라즈마를 이용한 박막 재료 제조 및 공정을 연구하고 있다. 플라즈마(상압이나 저압에서)는 미세구조를 개질하거나 식각(etching), 물질을 증착할 수 있는 반응성 라디칼(reactive radical)을 형성하는데 사용할 수 있다. 불균일 화학적 특징은 매우 가치있는 중간성상인 다이아몬드나 실리콘 위에 절연막등을 제조할 수 있게 하고 microelectronic feature를 형성하기 위하여 실리콘을 식각할 수 있도록 해준다. 다이아몬드 제조, 산화물이나 질화물 및 내화금속의 제조 및 증착, 실

리콘의 식각등을 할수 있는 가스상과 표면기구에 대한 기초연구를 행하고 있다. 이를 위해 상압 교류 및 직류 아아크 발생장치(RF & DC arc source), 저압 아아크 제트장치(low pressure arcjets), 교류 및 극초단파 글로우 방전장치(RF & microwave glow discharge)와 스파크 용융반응기(spark ablation reactor)등을 사용하고 있다. 주된 관심사는 증착과 식각 공정 동안 형성되는 가스상과 표면의 진단에 있다. 상압에서 다이아몬드 박막을 증착하는 CVD법은 저압에서 행해지고 있는 CVD법을 몇가지 이유에서 대체해 나갈 것이다^[10]. 상압에서 얻을 수 있는 많은 양의 반응물들은 대면적 위에 큰 성장속도로 다이아몬드를 성장시킬 수 있게 해준다. 또한 상압에서 행해지는 CVD법은 진공 장치에서와 같이 시편을 장입하고 빼고 하는 작업을 배제할 수 있다. RF-ICP(radio-frequency, Inductively Coupled Plasma)^[11]를 선택하면 대면적 증착을 할 수 있도록 비교적 넓고 안정된 플라즈마를 얻을 수 있고 무전극 방전은 증착된 박막의 오염을 최소화 해준다. 이러한 특징은 다이아몬드 증착 공정의 경제성을 크게 향상 시키고 산업화시 수반되는 공장의 라인을 크게 간소화시킬 수 있다. 현재는 기판의 온도도와 수소대 메탄 가스의 비에 따른 다이아몬드 성장 형태와 성장 속도에 대해 연구중이다. 그리고 freestream의 Reynolds 수를 바꾸는 것이 증착 분위기와 증착되는 다이아몬드에 어떤 영향을 미치는지에 대해서도 연구중이다. 양질의 다이아몬드를 1 inch의 직경을 가지는 기판에 약 60 μm /hr의 속도로 증착할 수 있었다.

3-1. 상압 플라즈마의 발생장치

3-1-1. Stanford 대학의 RF torch^[12]

작은 양의 메탄, 수소, 산소, 이산화탄소 및 수분을 함유하는 아르곤이나 공기 및 질소 가스를 사용하는 중간 정도 크기의 플라즈마 장치가

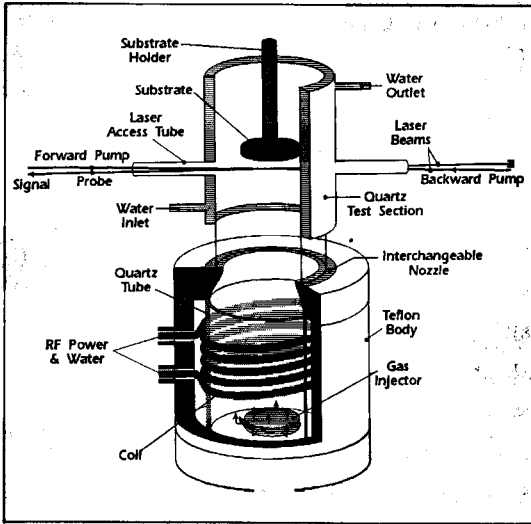


그림 1. Stanford 대학에서 창안한 RF torch

다. 온도가 10,000K 정도인 상압 플라즈마를 발생시킬 수 있다. 그림 1에서 보는 바와 같은 모델은 50 KW급 TAFE model 66 Radio-Frequency (RF) 유도 플라즈마 토치이고 LEPEL model T-50-3 power supply로써 전원이 공급되고 4MHz로 동작한다.

이 장치의 토치 윗부분은 5회 감은 구리 유도 코일이 있고 3mm 두께의 석영관으로 싸 후 최종적으로 테프론 몸체로 싸도록 구성되어 있다. 토치 윗부분의 전체 크기는 직경이 약 15cm이고 높이가 35cm이다. Deionized 냉각수가 테프론 몸체와 내부의 석영관사이에서 부하를 주는 코일 주위를 순환하도록 하여 부하 코일과 내부의 석영관을 냉각하도록 구성되어 있다. 구리 노즐은 0.5, 1.27, 2.0, 2.54, 3.81, 5.0 그리고 7.0cm의 직경으로 유동하는 플라즈마의 크기와 속도에 따라 교환할 수 있도록 고안되어 있다. 몇가지 유동반응기(flow reactor)가 플라즈마 토치와 결합하여 사용할 수 있다. 이들 유동반응기는 이중벽으로 냉각수를 돌릴 수 있도록 고안하여 플라즈마 토치의 노즐에 결합한다. 이러한 반응기는 직경이 1, 2, 5, 7cm이고 유동 길이는 10과 100cm사이 이다. 시험용기(Test section)는

2mm 두께의 황동 튜브나 석영관으로 만들어져 있고 튜브 가운데에 2mm 두께로 냉각수가 들 수 있도록 고안되었다. 이러한 배열의 토치에서 형성된 플라즈마는 잘 조절된 분위기에서 미리 설정된 잔류시간(residence time)동안 유동할 수 있다.

3-1-2. Stanford 대학의 DC-arcjet

이 플라즈마 장치는 상압 직류 아아크제트 (DC arcjet)를 집중시킨다. 시험 단면과 광학 진단 방법은 유도 토치(RF torch)와 같다. 직류 아아크제트 장치는 균일하고 높은 상압 플라즈마 유동 속도를 적당하게 하여 온도가 약 8,000K 정도가 되도록 해준다. 직류 아아크제트 자체는 Thermal Dynamics Model F-5000의 소용돌이치는 모양의 안정화된 직류 아아크제트이고 세계의 정류 저장소로부터 200KW까지의 전력을 얻을 수 있다. 그것은 용융된 스팟(spot) 텅스텐 전극과 냉각수로 냉각되는 구리 양극/노즐에 사용하고 있다. 아아크제트는 전형적으로 아르곤 가스를 사용하고 있고 플라즈마에 주입된 공정 가스들은 아아크제트아래에 있는 작은 통풍구를 통하여 빠져나간다. 혼합 플라즈마는 교환할 수 있는 노즐을 통하여 공정 반응 테스트 섹션으로 향하고 출구의 직경을 변화시킬 수 있도록 함으로써 플라즈마의 유동 속도를 변화시킨다. 이 플라즈마/노즐 설계는 플라즈마 제조법의 일반적인 직류 아아크제트에 비해 기판에 균일한 플라즈마 유동을 제공할 수 있도록 한다. 공정 반응 시험관안에 기하학적으로 유동이 정지하게 되는 위치에 기판은 플라즈마와 수직이 되도록 놓이게 된다. 기판은 적당한 두께를 가지는 단 열재로 냉각되고 있는 홀더와 분리된다. 따라서 기판의 온도를 조절할 수 있게되어 창을 통하여 고온계(pyrometer)로 기판의 온도를 측정한다. 기판은 아아크제트와 플라즈마에 대해 별도로 바이어스를 가할 수 있도록 고안되었다. 예비 방전 실험에서 4개의 Kepco Model ATE 100-

10M Power supply를 병렬로 연결한 저장소로부터 바이어스를 가할 수 있도록 했으며 각각은 100V - 10A까지 인가할 수 있다.

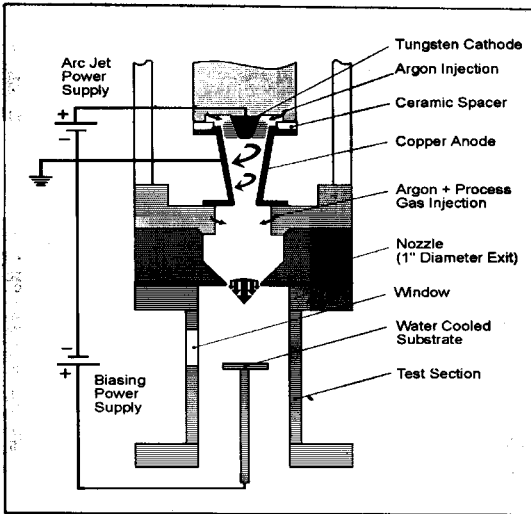


그림 2. Stanford 대학에서 창안한 DC-arcjet.

3-1-3. UCLA의 RF plasma torch^[13]

그림 3에 나타낸 이 장치의 유도 플라즈마(Radio frequency generated plasma)는 유해한 폐기물들을 분해할 수 있을 만큼 높은 온도를 낼 수 있다. 이 장치는 전극 없이 고압에서 작

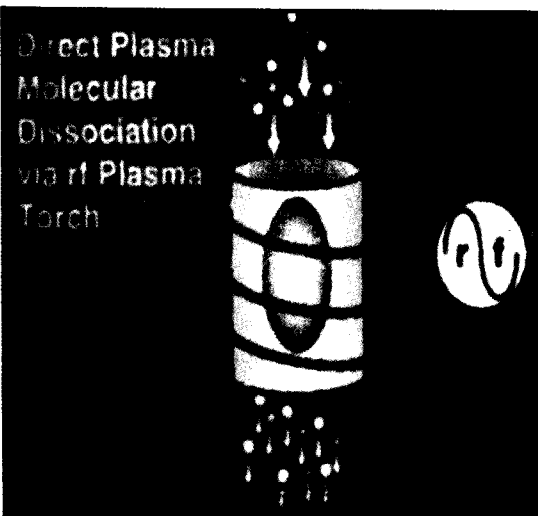


그림 3. RF plasma torch in UCLA.

동하며 높은 처리량(throughput)을 가진다. 상압에서 70KW의 전력으로 작동하는 토치(torch)는 HIPAS(High Power Auroral Stimulation) 시설에 설치하여 전시되어 왔다. 향후 설계 목적은 100KW에서 연속적으로 작동할 수 있도록 하는 것이다.

3-1-4. UCLA의 high pressure plasma centrifuge

그림 4에 나타낸 장치는 UCLA에 있는 플라즈마 원심분리기(plasma centrifuge)로서 30kG 초전도 자석을 사용하여 15kW, 3kV의 전원 공급 장치에 의해 작동된다. 700 torr에서 작동하는 것이 전시되고 있다. 교차되는 전기장(E)과 자기장(B)은 플라즈마를 수 km/sec까지 회전시킬 수 있다. 이 장치를 이용하여 이온들의 무게에 따라 분리할 수 있게 된다.

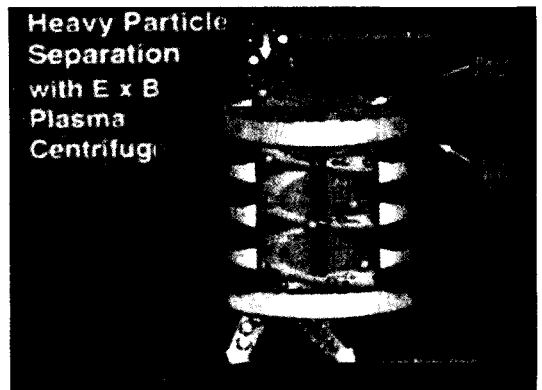


그림 4. High pressure plasma pentrifuqe in UCLA.

3-1-5. UCLA의 isotope separation

그림 5에 나타낸 장치에서 사용되는 Plasma Enrichment Process(PEP)는 도슨 동위원소 분리(Dawson isotope separation) 과정에 기초하고 있다. 이 과정은 한 동위원소만을 선택적으로 에너지를 주는 Ion Cyclotron Resonance Heating(ICRH)를 사용한다. 수집 모듈(Collection module)에서 고에너지 입자와 저에너지 입자를 구별하여 수집한다. 가장 간단한 수집기는

large cyclotron orbit를 가지는 입자들을 수집하는 것이다. UCLA에서 2kW, 10GHz electron cyclotron resonance source의 고밀도 플라즈마 장치를 창안하였다. 입자들의 분리는 약 6kG의 균일한 자장 영역에서 일어난다. 플라즈마 직경은 약 10cm이고 작동하는 길이는 약 1m이다. 분리된 첫 번째 동위원소로는 칼슘이다. 여러 칼슘 동위원소들은 영양학, 골다공증, 췌의 분비, 뼈에 발생하는 질병과 당뇨병의 연구등 의학에 사용된다.

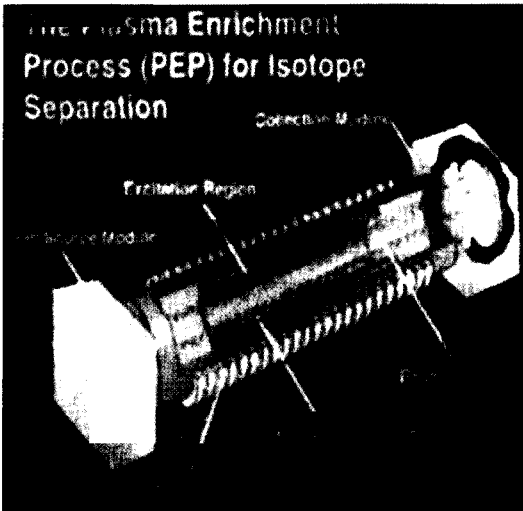


그림 5. 동위 원소 분리 장치.

4. 결론

이상에서 살펴본 바와 같이 상압 플라즈마를 이용한 재료의 증착 및 표면처리, 입자 분리, 유독 가스 분해등 진공에서 플라즈마를 이용하여 행할수 있는 대부분의 일들이 연구되고 있다. 특히 CVD법을 이용하여 증착하는 다이아몬드나 DLC(Diamond Like Carbon)등은 아아크 방전을 이용하여 상압에서 제조하면 증착속도가 훨씬 빨라지는 것으로 보고되고 있다. 그리고 글로우 방전 영역을 이용하여 박막을 증착하면 대면적의 균일한 증착이 가능할 것으로 예측되

고 시편의 형상에 무관하게 탄화 및 질화처리를 할 수 있을 것으로 예측된다.

상압에서 재료를 증착할 때에는 진공에서와 달리 공기중에서 존재할 수 있는 불순물들을 제어하는 방법이 해결되어야 한다. 그리고 진공에 비해 플라즈마를 안정적으로 조절하는 것이 매우 어렵다. 특히, 고온 플라즈마인 아아크 방전보다 저온 플라즈마인 글로우 방전 영역을 이용할 경우에는 아직도 해결해야 할 많은 난관이 놓여 있다.

상압 플라즈마를 이용할 경우에는 비싼 진공 장비가 필요없다는 장점과 향후 대량 생산으로의 전환도 용이하며 습식공정과 함께 연속공정으로 설계하는 것도 용이하다. 따라서 상압 플라즈마를 이용한 박막 증착 장치 개발 및 공정 개발은 시급히 진행되어야 할 과제라 할 수 있다.

참고 문헌

- [1] von Engel A, Seeliger R and Steenbeck M, Z. Phys., Vol 85 (1933) 144.
- [2] 송 영훈, 김 석준, "코로나 방전을 이용한 플라즈마 탈황/탈질 시스템의 국내의 기술동향", 기계와 재료, Vol. 7, No. 1 (1995) 59.
- [3] Brian Chapman, Glow discharge processes, John Wiley & Sons, (1980).
- [4] Raymond L. Boxman, DavidM. Sanders, Philips J. Martin and James M. Lafferty, Handbook of vacuum arc science and technology, Noyes Publications, (1995).
- [5] T.Yokoyama and S.Okazaki, J. Phys. D : Appl. Phys. 23 (1990) 1125-1128
- [6] M.Kogoma and S.Okazaki, J. Phys. D : Appl. Phys. 27 (1994) 1985-1987
- [7] Yu.S.Akishev, et al, Plasma Physics reports Vol. 20, No. 6 (1994) 511-524
- [8] <http://www.llnl.gov>

[9] <http://www-leland.stanford.edu/group/HTGL/material.html>
[10] <http://saha.stanford.edu/epri.html>
[11] <http://www-krq.stanford.edu/epri.html>

[12] <http://www-krq.stanford.edu/plasgen.html>
[13] <http://www.physics.ucla.edu/~hipas/plasmag.html>