

대기압 플라즈마기술 현황

남 기 석

한국기계연구원 표면연구부

Current Status of Atmospheric Pressure Plasma Technology

Kee-Seok Nam

Surface Engineering Dept. KIMM, Changwon, Kyungnam 641-010, Korea

1. 머릿말

플라즈마는 전기가 통하는 중성 전리가스 즉 대량의 전리가 일어나지 않는 기체 중의 이온이나 전자가 희박하게 존재하는 거의 대부분 중성에 가까운 기체상태로 그 온도에 따라 저온과 고온 플라즈마로 나누어진다. 그 중 저온 플라즈마로 대표되는 글로우 방전 플라즈마는 진공 중의 음극에서 발생된 2차 전자가 기체분자와 충돌하여 가속되어 전기장으로부터 에너지를 얻은 다음 충돌을 통해 눈사태와 같이 전리하여 형성된다.

그러나 기체의 압력이 점차 상승하는 경우 전자와 입자간의 충돌횟수가 많아지고 그것으로 인해 평균에너지가 낮아져 방전이 용이하게 유지되지 않는다. 따라서 압력이 높아 질수록 방전을 유지하기 위한 에너지, 즉 전압을 더욱 더 크게 가하여야 하며, 그 경우 고온의 아크 플라즈마가 형성된다.

플라즈마를 발생시키는 가장 간단한 방법은 방전으로 10^9 K 이상의 초고온 아크 플라즈마를 발생시켜 핵융합 장치 제작에 이용하는 한편, 450 K 이하의 낮은 온도를 유지하는 글로우방전 플라즈마는 반도체 제조는 물론 금속, 세라믹 등의 박막제조 및 물질합성에 활용되고 있다. 또한 코로나방전을 통한 플라즈마는 공기청정기를 제작하는데 이용되는 등 아주 다양한 응용범위를 가진다.

한편 낮은 압력에서의 글로우방전의 경우 큰 체적의 균일한 확산 플라즈마를 얻을 수 있으며, 그 응용분야가 다양하고 활용가치가 매우 높다. 그러나 진공유지를 위한 장치가 필요하여 처리물의 제한이 수반됨과 동시에 처리공정의 연속화를 도모하기 어려운

등 공업화에 많은 문제점을 가지고 있다.

대기압하에서 저온 플라즈마 즉 글로우방전과 같은 플라즈마를 얻을 수 있다면 진공유지, 처리물 장입과 관련된 장치비용을 대폭 경감할 수 있다. 또한 증기압이 높은 시료나 탈가스 등의 문제가 발생함에도 불구하고 할 수 없이 저압의 플라즈마로 처리하는 고무, 생체재료 등의 새로운 분야에 응용될 수 있다.

그 동안 대기압에서 저온 플라즈마를 얻기 위한 수 많은 연구가 이루어져 왔으며, 그 결과 펄스방전을 통해 고온의 아크플라즈마로 전환되는 것을 억제하는 코로나방전, 유전체방전, 마이크로파방전, 그리고 플라즈마젯 등의 방전법과 그것을 이용한 각종 응용기술이 개발되고 있다.

이들 방전법을 이용한 저온 플라즈마 발생기술이 장치 환경, 물질합성 및 보건의료 등 각종 분야에 널리 활용될 것으로 기대되며, 따라서 그 기술 확보를 위한 노력이 절실히 요구된다.

2. 플라즈마 종류 및 특성

2.1 코로나방전 플라즈마

대기압, 또는 그 부근의 압력에서 침상 전극의 선단에 형성된 강한 전계가 파괴되어 일어난다. 전계강도는 침상 전극의 끝단 부분에서 판상전극 방향으로 급격히 낮아지며, 그 침상 전극의 끝 부위에서 형성된 양이온은 대향한 음극의 판상전극 방향으로 낮은 속도로 이동한다. 그 이온이 이동하는 부분에서는 이온화나 분자의 여기반응이 일어나며 대부분 전극사이에서 발광하게 된다.

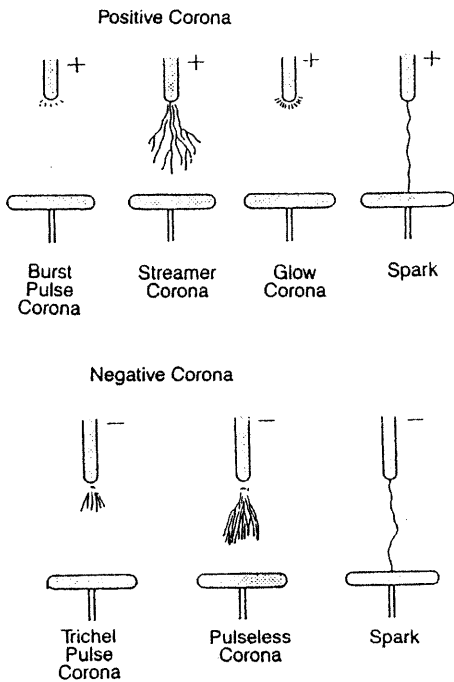


그림 1. 코로나방전 종류 및 전극형태.

전계의 극성과 전극의 형태 및 배열에 의존하여 여러 가지 형태의 코로나방전이 일어난다. 그림 1은 코로나방전의 형태를 나타낸 것으로 발광이 침상판 상 배열 전극의 양극에서 시작되어 음극방향으로 진행되는 양극 코로나의 경우 방전은 인가전압이 높아짐에 따라 버스트 펄스 코로나의 형태로 시작되어 스트리머 코로나, 글로우 코로나 및 스파크방전으로 진행된다. 이들 중 스트리머 코로나는 양극과 음극의 전극공간에서의 발광공간, 즉 화학반응에 필요한 에너지를 갖는 전자의 존재구역이 다른 종류의 코로나보다 크다. 양극 코로나 방전의 파괴전압은 전극 끝 부위의 반경과 두 전극 간 거리에 의존한다.

그 반대로 발광이 음극에서 일어나 양극으로 이동

하는 음극 코로나의 경우 파괴전압을 초월하면 트리셀 펄스 코로나가 형성되고 그 다음 펄스리스 코로나 및 스파크방전으로 전환된다. 트리셀 펄스코로나 방전시 인가전압에 비례하고, 전극선단의 반경에 의존하는 주파수의 짧은 펄스전류가 흐르게 된다. 전극 끝단 주위에서의 공간 전하 현상에 기인하여 음극 코로나는 양극 코로나보다 전극 끝단의 곡률반경에 덜 민감하다. 전극 끝단의 작은 곡률반경은 중성분자의 이온화에 필요한 강한 전계를 형성한다. 그 전기장 강도는 다른 전극에 대향한 전극 끝단으로부터 멀어질 때 급격히 떨어져 특성을 잃게 된다.

코로나방전을 이용한 처리공정은 방전극성과 혼합 가스를 통해 발생된 이온이나 전자의 특성을 이용하게 된다. 보통 양극 코로나는 음극 코로나보다 안정하여 스파크방전으로 전이될 가능성이 적어 플라즈마 탈황탈질 시스템에 적용되며, 그와 반대로 전기집진기에서는 입자의 하전이 상대적으로 용이한 음극 코로나가 사용된다. 표 1에 코로나 방전의 주요 특성을 나타내었으며, 전극선단 주위에서의 활성체적이 작아 다량의 공업적 생산에는 적합하지 않고, 단지 매우 적은 농도의 활성, 또는 하전종의 생산이 필요한 곳에 적합하다.

2.2 유전체 방전 플라즈마

무성방전(Silent electric discharge) 플라즈마라고도 부르는 유전체 방전(Dielectric barrier discharge) 플라즈마는 고압의 코로나방전과 큰 여기 체적의 글로우방전이 결합된 것이다. 그림 2와 같이 두 전극 중의 하나, 또는 모두에 유전체를 설치하는 것이 특징이며, 그 유전체는 전하의 양을 제한하고, 방전이 전극 전체에서 이루어지도록 하는 기능을 갖는다.

두 전극사이의 한 위치에서 이온화가 일어나면 유전체 표면에 전하집적이 일어나며, 그 전하에 기인하

표 1. 대기압 방전 플라즈마의 주요특성

구 분	방전개시전압 (kV)	플라즈마 밀도 (cm ⁻³)	산소종 밀도 (cm ⁻³)		
			O ⁺ , O ₂ ⁺ , O ⁻	O	O ₃
저 압 방 전	0.2~0.8	10 ⁸ ~10 ¹³	10 ¹⁰	10 ¹⁴	10 ¹⁰
코로나 방 전	10~50	10 ⁹ ~10 ¹³	10 ¹⁰	10 ¹²	10 ¹⁸
유전체 방 전	5~25	10 ¹² ~10 ¹³	10 ¹⁰	10 ¹²	10 ¹⁸
플라즈마제트 (APPJ)	0.05~0.2	10 ¹¹ ~10 ¹²	10 ¹²	10 ¹⁶	10 ¹⁶

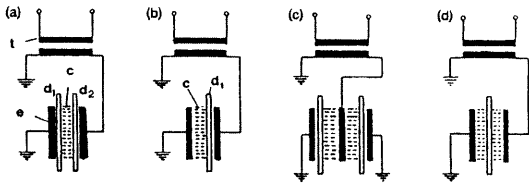


그림 2. 유전체 방전의 전극형태.

여 전극간의 전계가 감소되고 수 나노초 후에 전류의 흐름이 중단된다. 즉 역전위의 형성으로 방전이 정지되어 kHz~MHz의 펄스방전이 일어나게 되며, 전류의 펄스 지속시간은 압력, 가스의 이온화 및 유전체의 특성에 의존한다. 표 1에 그 주요특성을 나타내었다.

그림 3은 사인파전압을 가할 때 일어나는 마이크로방전의 전류변화를 나타낸 것으로 인가전압이 최고 및 최저 지점에서 전류의 변화는 0이다. 따라서 마이크로방전이 중단되며, 그 다음 반파장에서 파괴전계에 도달할 때 다시 마이크로방전이 시작된다. 충분한 크기의 전압이 가해질 때 상당히 많은 수의 마이크로방전이 시간 및 공간적으로 무질서하게 분산된 필라멘트형태로 일어나며 극히 불균일하다. 그림 4는 투명한 전극을 통해 찍은 마이크로방전 분포를 나타낸 사진이다.

유전체 방전은 에너지를 갖는 전자를 포함하고 있는 우수한 필라멘트원이며, 거의 모든 가스에서 방전시 저감장은 약 1~10 eV의 전자에너지에 해당한다. 이것은 원자 및 분자종의 여기, 그리고 화학결합을 파괴하기에 이상적인 에너지 범위이다.

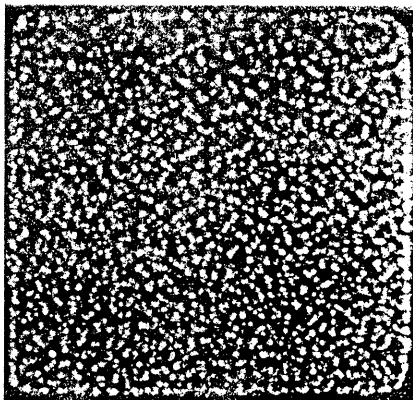


그림 3. 대기중 마이크로방전 형태.

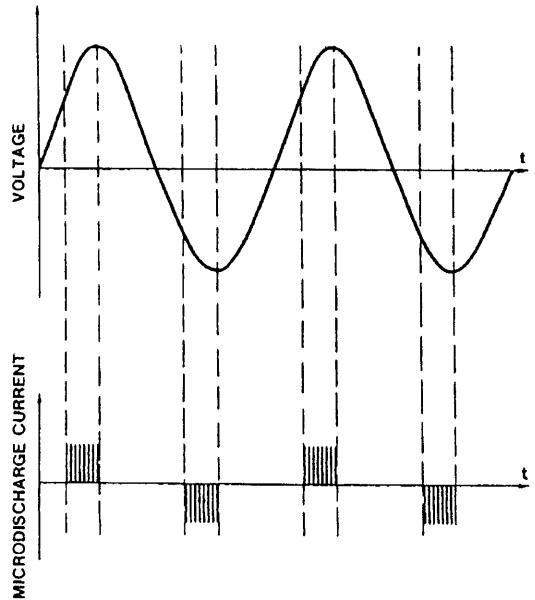


그림 4. 마이크로방전시 전류변화.

2.3 대기압 글로우방전 플라즈마

대기압 글로우방전 플라즈마 발생기술 즉, APG (Atmospheric pressure glow discharge plasma)의 개발은 열교환기, 인쇄, 섬유직물의 염색 등 비교적 대형 대면적으로 증기압이 높은 물질의 처리가 발단이 되었다. 대면적은 면적당 가공비의 제한과 수 Torr의 진공도를 유지하기 위한 방법이 적합하지 않아 대기압에서의 플라즈마 처리가 바람직하다. 일반적으로 표면 친수화에 이용되는 대기중 코로나방전, 화염, 무성방전도 아크에 의한 고온은 아니나 균일한 처리를 고려하여 저압의 글로우방전과 같은 대기압 글로우방전 플라즈마의 필요성이 요구되었다.

Engel 등은 1933년 전극을 냉각시키고 H₂를 방전 가스로 사용하여 대기압에서 글로우방전을 안정화시킬 수 있음을 보고하였으나 전극의 온도를 제어하여야 하므로 그 방법을 플라즈마공정에 적용할 수 없었다. 그러나 Kanazawa 등은 1987년 전극 상부에 매우 가는 브러시형태의 전극, 그리고 하부전극위에 고체유전판을 설치하며, kHz 이상의 고주파전원을 인가하고, He를 희석가스로 사용 아크방전으로의 전이를 억제하는 APG 방전 플라즈마 발생기술을 개발하였다. Engel 등의 기술과는 달리 전극을 냉각시킬 필요가 없으며, 저압 글로우방전보다 장치비가 저렴

하여 공업적으로 적용하기 용이하였다. 그러나 시료 기판이 금속인 경우 방전이 장시간 이루어지는 경우 아크로 전이될 확율이 크고, 견디지 못하여 유전체를 피복한 판상전극으로 개량하였다.

APG 플라즈마를 안정화시키기 위한 요구조건은 He 가스의 사용, 유전체 삽입, 고주파전원 사용 등이며, 그 3가지 조건은 상호 관련이 있다. 전극사이의 유전체 사용은 유전체의 전하집적을 통한 역전압의 형성으로 방전이 정지되어 방전전류는 펄스형태로 된다. 그리고 He의 경우 파괴전압이 매우 낮고, 아크방전으로의 전이 시간이 길다. 또한, 이와 함께 20 eV의 높은 에너지의 준안정상태에 놓이게 되므로서 유전체에서의 마이크로방전시간이 길어져 안정된 글로우방전 플라즈마를 얻을 수 있는 것으로 보고되고 있다.

Roth는 안정한 글로우방전 플라즈마를 얻기 위해 그림 5와 같은 구조의 전극에 RF전원을 인가하는 방법을 개발하였다. 상부전극은 금속 및 유전체로 되어 있고, 하부전극과의 사이에 접지된 중간 스크린을 설치하였으며, RF전계의 인가주파수가 이온들이 중간스크린과 전극사이에 충분히 트랩 되고, 전자들은 트랩 되지 않는 범위일 때 가장 안정한 글로우방전 플라즈마를 얻을 수 있다.

S. Selwyn은 13.56 MHz의 100~250 V RF전원을 사용하고, 플라즈마를 안정화시키기 위한 구조의 금속으로 이루어진 음극의 내부 관과 접지된 양극의 외부 관으로 이루어진 이중관형태의 전극사이에 He의 비롯한 방전가스를 고속으로 공급하여 글로우방전 플라즈마를 안정화시키는 그림 6과 같은 APPJ (Atmospheric pressure plasma jet) 기술을 개발하였

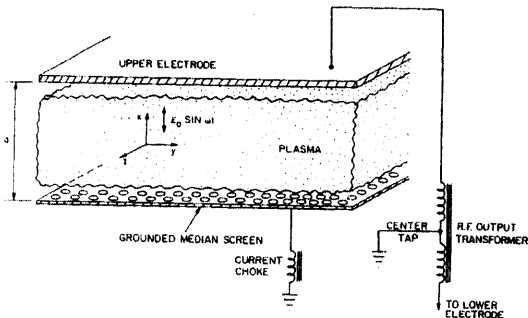


그림 5. 대기압 글로우방전 전극 구조(Roth).

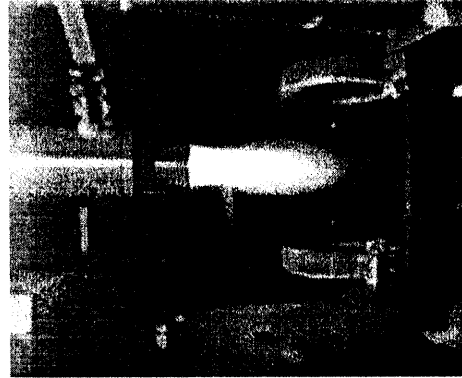


그림 6. APPJ 플라즈마 형태(Selwyn).

다. 표 1에 APPJ기술을 이용한 플라즈마의 특성을 나타내었다.

E. Kunhardt는 전극에 다수의 홀을 가진 유전체를 설치 캐필러리 방전효과를 이용하여 방전개시 및 유지전압이 낮으며, 밀도가 높은 안정한 글로우방전 플라즈마를 발생시킬 수 있는 CEDP(Capillary electrode discharge plasma) 기술을 개발하였다. KIMM에서도 캐필러리방전을 일으킬 수 있는 다른 구조의 전극을 통해 대기압에서 안정한 글로우방전 플라즈마를 얻을 수 있는 기술을 개발하였다. 그 외에 마이크로파방전을 이용한 글로우방전 플라즈마 발생기술이 개발되어 활용되고 있다.

3. 대기압 플라즈마의 응용분야

3.1 오존의 제조

독일의 지멘스사가 1857년 최초로 코로나방전기술을 이용하여 오존을 제조하였다. 그 후 유전체 방전기술이 활용되었으며, 최근 대기압 글로우방전 플라즈마 발생기술이 개발됨에 따라 이 방법을 이용한 오존제조기술에 대한 관심이 높아지고 있다.

오존은 3개의 산소원자가 4가지 형상의 공명구조로 결합된 형태로 존재하며 불소 다음으로 강력한 산화력을 가지며, 살균, 탈취, 탈색, 유기물 및 무기물과의 반응성을 가진다. 고급산화(AOP)는 물론, 상수, 오수, 폐수처리, 분뇨처리, 공장용수의 냉각탑 살균, 지하수의 Fe, Mn 제거, 탈취 등에 적용된다. PE의 접착성 강화, 필름제지의 표백, 의약품 제조 및 화학공업에 활용되고 있으며, 그 외에 오존수 제조, 공기

정화 및 에어컨 흡입공기의 살균 등에 여러 분야에 널리 이용된다.

3.2 유해 폐기물 제거

자동차, 공장, 화력발전소, 소각로 및 가스터빈 등의 연소과정에서 발생하는 질소산화물(NO_x) 및 황산화물(SO_x)은 물론 메탄(CH_4), VOC 및 이산화탄소(CO_2) 등의 정화에 활용된다. 그림 7은 코로나방전을 이용한 자동차 배기가스 정화장치를 나타낸다. PCB, 페놀, 다이옥신, 신경가스, 농약, 솔벤트 및 중금속 등의 각종 독극물의 제거와 유해 폐기물을 저 준위 방사성 폐기물로 전환시키는 데에도 대기압 글로우방전 플라즈마가 활용된다.

3.3 화학 물질 합성

N_2/H_2 , H_2/O_2 , N_2/O_2 계 화합물, C_2H_2 등의 유기 화합물 및 유기금속화합물, UV발생용 Xe_2^* , KrF^* 및 Ar_2F^* 등의 엑사이머, 에탄올 및 메탄올 제조공정에 이용된다.

3.4 표면 활성화 및 세정

대기압 플라즈마가 플라스틱 성형 시 부착되는 왁스, 비누, 실리콘계 등의 이형제와 유지류 제거와 표면활성화에 이용되며, 도장하기 전의 프라이머 도장이 필요 없다. 또한 활성화에 의해 플라스틱의 표면장력을 물이 젖는 72 mN/m 까지 높일 수 있으며, 앞으로 예상되는 휘발성 유기화합물(VOC)의 규제 관점에서 유성페인트에서 수성페인트에 이르기까지 대체가 가능한 수단으로 주목받고 있다. 대기압 플라

즈마의 가장 많은 응용분야를 가지고 있으며, 폴리프로필렌을 제조된 카펫퍼, 폐놀수지로부터 자동차용 재떨이의 도장 전처리, 폴리카보네이트로된 헤드런 플리플렉터의 알루미늄 진공증착전 세정 및 활성화, 자동차용 점화코일의 에폭시수지 몰딩 전처리, 외면의 인쇄성과 내면의 에폭시수지와외의 접착성향상을 목적으로 하는 폴리스틸렌 전기 릴레이 케이스 전처리 등 수 많은 응용 예가 있다.

즉 알루미늄, 폴리아미드, 폴리에틸렌, PET, OPP, 퍼스펙스, 테프론, 포리아미드 섬유, 폴리에스터 섬유, 폴리프로필렌 섬유 등 각종재료의 접합, 페인팅, 라미네이션, 코팅, 메탈라이징시 표면 활성화에 대기압 플라즈마가 이용된다.

플라즈마의 화학반응성을 이용 유지를 분해시켜 가스화하여 탈지하기 때문에 정밀탈지가 가능하다. 또한 가스 상을 이용한 건식세정이기 때문에 습식세정의 초음파가 도달하기 어려운 좁은 틈이나 내부도 세정이 가능하다. 그것으로 인해 종래의 프론이나 에탄 등의 유기용제 이상의 탈지성이 얻어지고, 고도의 탈지성이 요구되는 접점 등의 전기부품 세정이나 메탈가스켓, 고무, 복합재료 등의 접착전 탈지에 활용되고 있다.

유리표면에 흡착된 유기질 오염물과 잔류 알칼리 이온을 플라즈마에 의해 제거하는 것이 가능하며, 그것을 통해 유리의 내식성, 절연성, 표면강도, 접착성을 높임과 동시에 광투과성을 향상시키는 것이 가능하다. 렌즈에서는 반사방지막이나 손상된 방지막의 밀착성을 높이기 위한 전처리에 알맞고 다수의 실용화 예가 있다.

고분자 필름의 표면에 불소화합물을 형성하여 시간이 경과되어도 비교적 안정한 특성의 소수성을 띠게 할 수 있으며, 종래 코로나방전으로는 어려웠던 PTFE의 접착성 개선이 글로우방전 플라즈마의 적용으로 가능하게 되었다. 표 2에 공업적 규모의 장치에서 얻어진 접착강도 자료를 나타내었다.

섬유의 표면을 He에 소량의 불소계 모노머를 첨가하여 방전시킨 플라즈마 처리하면 촉감, 소수성, 방축성 등이 개선된다. 한편 저압 플라즈마로 처리하는 경우 중합반응과 동시에 이온충격에 의해 표면이 거칠어지고, 양모 특유의 외피특성을 파손시켜 결과적으로 촉감이나 강도를 손상시키게 된다. 그러나 대

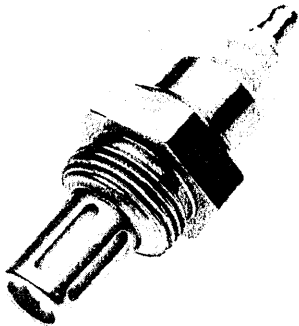


그림 7. 자동차 배기가스 정화용 코로나방전 장치(Litex사).

표 2. 플라즈마 처리 전후의 재료별 접착강도

종류	두께 (μm)	접착강도 (g/cm)	
		처리전	처리후
PVDF	100	5	>1800
ETFE	60	20	850
FEP	100	20	>1500
PFA	50	10	550
PTFE	100	0	430

※ 에폭시로 접착한 다음 180, peel 시험

기압 글로우방전 플라즈마는 표면이 거칠어지지 않는 특징이 있다. 한편 기체를 변화시켜 부직포나 카본섬유 등의 친수화가 가능하다.

금속표면은 보통 자연산화막으로 피복되어 있기 때문에 납땀, 용착, 접착, 무전해 도금 등의 활성화 전처리, 그리고 압연, 단조 등을 비롯한 소성가공시 도입된 오일, 이형제, 윤활제 등의 제거와 산세 대체 공정에 대기압 플라즈마가 활용된다.

그 외에 PCB, 리드프레임, 와이어본딩, 패키징, BGA 하이브리드, 하드디스크, 폴리머접착, 웨이퍼 및 광부품 제조의 세정 및 접착공정과 인쇄 및 마킹의 전처리공정에 대기압 플라즈마가 이용된다.

3.5 미소가공

그림 8은 APPJ 플라즈마 발생 기술을 이용하여 Kapton, SiO₂, Ta, W 등을 에칭한 결과이며, 그 외에 전자부품의 유전체층으로 사용되는 폴리이미드를 APPJ 기술을 이용하여 에칭하는 경우 250°C에서 8 μm/min의 에칭속도가 얻어졌다. 절단, 연마 등의 플라즈마 CVM(chemical vapor machining)기술에 대기압 플라즈마가 이용되며, 종래의 가공기술에서보다 우수한 절삭속도 및 표면 거칠기가 얻어진다. 표 3은 재료별 절삭속도 및 표면 거칠기를 나타낸다.

3.6 박막합성/표면개질

반도체, 촉매, 유전체, 내마모 등에의 사용을 목적으로한 GaN, SiO₂, TiO₂, HMDSO 폴리머, 다이아몬드, DLC 박막제조에 이용된다. 저마찰 및 반열전 응용 기능 부여를 위한 PTFE, 그리고 음식물/음료수의 포장시 산소 차단을 위한 SiO_x, SiN_xO_y 박막은 물론, 반도체의 절연층, 또는 의료기구를 피복하

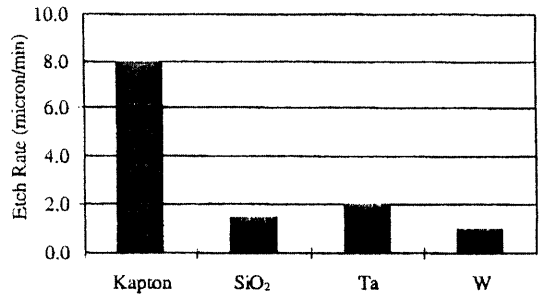


그림 8. APPJ 플라즈마를 이용한 각종 재료의 에칭속도.

기 위한 파릴렌 박막과 방수를 목적으로 한 탄화수소박막 합성에 활용된다.

타늄합금을 질화하여 TiN 형성시키는데 이용되며, 질화속도가 큰 특징을 갖는다. PTFE, 폴리머 및 고무 표면의 친수화를 통한 접착성 개선을 위해 대기압 플라즈마가 사용된다. 또한 기체류를 이용하여 분말을 표면처리하는 데에도 사용된다. 비정질 합금분말인 (Co,Fe,Si,B)계의 경우 투자율은 통상의 페라이트에 비해 극히 높으나 도전성 때문에 와전류효과가 일어나 고주파대에서는 사용하지 않는다. 그러나 대기압 분말처리장치를 이용하여 비정질 자성 분말 표면에 수 nm의 ZrO₂ 초박막을 피복하여 분말의 절연성을 향상시켜 고주파특성을 대폭 개선하였다. 그 분말 외에 Fe₂O₃, FeOOH, Fe₃O₄, TiO, TiO₂, SiO₂, Al₂O₃, ZnS, 형광체 및 유기안료 등의 분말합

표 3. 플라즈마 CVM 의 절삭특성

재료	절삭속도 (μm/min)	표면 거칠기 (μm)
Si(단결정)	50	<0.001
GaAs(단결정)	20	<0.02
석영유리	2~3	<0.001
보로실리케이트유리	2~3	<0.02
BK7	2~3	~0.1
Al ₂ O ₃ (소결체)	0.5	~1
ZrO ₂ (소결체)	0.5	~1
TiC(화학증착박막)	2~3	0.2~0.3
TiC(소결체)	2~3	~1
SiC(소결체)	40	0.3~0.5
Si ₃ N ₄ (소결체)	2.5	0.5~1
W(다결정)	>15	0.3~0.5
Mo(다결정)	>15	~0.2

성에도 대기압 플라즈마기술이 사용되며, 매우 큰 기술 수요를 가지고 있다.

3.7 소독 및 살균

플라즈마는 유해 미생물들이 존재하는 매체를 손상 시킴이 없이 박테리아를 포함한 유해 미생물을 살균할 수 있기때문에 중요한 대기압 플라즈마의 응용분야의 하나로 부상되고 있다. 고체, 또는 액체상태의 음식물, 약품, 또는 토양 등의 환경분야, 의료기구 및 병원 폐기물, 그리고 금속, 플라스틱, 천 등으로 만들어진 이발소, 병원, 가정 등의 재사용품의 멸균 및 소독에 응용될 수 있다.

3.8 기타 응용 분야

세포를 배양하기 위한 표면친수화와 조기 발아를 위한 식물종자의 활성화 등에 대기압 플라즈마가 이용된다.

4. 맺음말

대기압 플라즈마 기술은 종래의 저압 플라즈마로는 처리가 불가능한 물질을 합성할 수 있고, 진공장치가 필요 없어 장치비가 저렴하며, 처리 공정이 비교적 간단하여 인라인화가 용이한 점 등 수많은 장점을 가지고 있다. 현재 반도체부품, 환경설비, 화학물질 및 재료합성, 그리고 의학 등 다양한 분야에 걸쳐

응용되고 있는 도입단계의 기술로 앞으로 그 수요가 크게 확대될 것으로 기대된다. 이에 대기압 플라즈마 발생은 물론, 그 응용기술을 확보하기 위한 기술이 개발이 요구된다.

참고문헌

1. M. Laroussi, Trans. on the Plasma Science, 24(3) 1188 (1996).
2. 清川和利, 表面技術, 51(2) 2000 (29).
3. B. Eliasson, IEEE Trans. on the Plasma Science, 19(6) (1991) (1063).
4. 小駒益弘, 表面技術, 51(2) 2000 (21).
5. Y. Mori, Nanotechnology, 4 (1993) 225.
6. A. Schute, IEEE Trans. on the Plasma Science, 26(6) (1998) 1685.
7. 岡崎幸子, 工業加熱, 27(1) (1995) 5.
8. J. Young, Plasma Source Technology, 7 (1998) 282.
9. L.J.Matienzo, Solid State Technology, July, (1995) 99.
10. L.Gigali, Plating & Surface Finishing, Nov. (1997) 10.
11. R. Prat, Polymer, 41 (2000) 7355.
12. P.Peter, Textile Res. J. 67(5) (1997) 359.
13. G. Baravian, Surface and Coating Technology, No. 115 (1999) 66.
14. 大倉 未代史, 工業加熱, 30(6) (1998) 49.
15. 村中恒男, 電熱, No.38 (1988) 22.
16. P.P.Ward, SAMPE J., 32(1) (1996) 51.
17. B. Kegel, Surface & Coating technology, 112 (1999) 63.
18. K. Yan, J. of Electrostatic, 44 (1998) 17.