

자장여과 아크 소스에서 각 전자석이 플라즈마 인출에 미치는 영향

김종국[†] · 변응선 · 이구현 · 조영상^{*}

한국기계연구원 표면기술연구부, *아텍시스템
(논문접수일 : 2001년 5월 21일)

The effects of solenoid magnet on plasma extraction in Filtered Vacuum Arc Source (FVAS)

Jong-Kuk Kim[†], Eungsun Byon, Koo-Hyun Lee, and Young-Sang Cho^{*}

Dept. Surface Engineering, Korea Institute of Machinery & Materials(KIMM)
^{*}A-tech system

(Received May 21, 2001)

요 약

비정질 다이아몬드 박막(amorphous-Diamond : a-D)을 증착하기 위하여 제작된 Filtered Vacuum Arc Source (FVAS)는 60도의 굽힘 각도를 가지는 토러스형 구조로 토러스 반경 266 mm, 플라즈마 덕트 반경 80 mm, 전체 길이 600 mm이며, 1 개의 영구자석 및 5 개의 전자석으로 되어있다. 플라즈마 덕트는 임의의 전압을 인가할 수 있도록 전기적으로 절연 시켰으며, 덕트 내부는 배플을 설치하여 macro-particle의 되튐 현상을 방지하였다. 사용된 음극은 직경 80 mm의 graphite이다.

각 전자석이 플라즈마 인출에 미치는 영향은 taguchi 실험계획법을 이용, 수치 모사와 실험을 행하였다. 소스 전자석과 인출 전자석은 아크의 안정성에 영향을 주었고, 빔 인출 전류는 낮은 소스 전자석 전류와 특정한 필터 전자석 전류에서 최대값을 나타내었다. 이때 소스, 인출, 굽힘, 반사, 출구 전자석의 전류값은 1A, 3 A, 5 A, 5 A, 5 A였으며, 아크 전류 30 A일 때, 빔 전류 밀도 3.2 mA/cm², 평균 증착률 5 Å/sec를 얻었다. 또한 플라즈마 덕트의 바이어스 전압 증가에 따라, 빔 전류 밀도는 증가하였으며, 더 효율적인 빔을 인출할 수 있었다.

Abstract

In this paper, the a-Diamond films were synthesized using filtered vacuum arc source (FVAS), FVAS was composed of a torus structure with bending angle of 60 degree. The radius of torus was 266 mm, the radius of plasma duct was 80 mm and the total length was 600 mm. The magnet parts were composed of one permanent magnet and five solenoid magnets. The plasma duct was electrically isolated from the ground so that a bias voltage could be applied. The baffles inside plasma duct were installed in order to prevent the recoil effect of macro-particles. Cathode was made of graphite with 80 mm in diameter.

The effects of solenoid magnet on plasma extraction were investigated by computer simulation and experiment using Taguchi's method. The source and extraction magnet affected the arc stabilization. The extraction beam current was maximized with low value of the source magnet current and high value of the filtering magnet current. The beam current density was 3.2 mA/cm² and average deposition rate was 5 Å/sec when the currents of arc discharge, source, extraction, bending, deflection and outlet magnet were 30 A, 1 A, 3 A, 5 A, 5 A, and 5 A, respectively. The beam current density and the efficiency of beam transportation were increased with the positive bias voltage of the plasma duct.

[†] E-mail : kjongk@kmail.kimm.re.kr

1. 서 론

다이아몬드상 카본(diamond-like carbon, DLC) 박막은 높은 경도, 내마모성, 윤활성, 평활한 표면조도 등의 뛰어난 기계적 특성과 전기절연성, 화학적 안정성 그리고 높은 광학적 투과성을 가지고 있어 산업적 활용 잠재력이 높은 재료로 평가되고 있다 [1,2]. 현재까지 대부분의 탄소계 박막은 반응 기체로서 탄화 수소계를 사용하는 RF-CVD 및 ion beam deposition 공정이 주를 이루었으나, DLC 형성시 수소의 영향에 의한 박막의 물질 변화로, 점점 고상의 카본을 이용한 laser ablation, magnetron sputtering 및 아크 증발법 등 수소가 함유되지 않은 박막의 코팅에 관심이 증대되고 있다 [3,4]. DLC에서 '수소 함유'는 큰 문제점의 하나로 수소 함유를 원천적으로 배제한다는 것은 큰 의미를 가진다. 따라서 아크법으로 증착된 DLC 박막을 비정질 다이아몬드(amorphous-Diamond : a-Diamond)박막이라 또는 tetra amorphous carbon (ta-C) 박막이라 부르기도 한다.

이중에서 진공 아크 증착법은 evaporation이나 sputtering등 다른 물리적 증착 방법에 비해 발생되는 이온의 에너지가 높고, 이온화율이 높으며 또한 이온 flux가 높기 때문에, sp^3/sp^2 비율이 높아, 다이아몬드에 가까운 높은 경도와 밀도를 가지며, 기판과 박막의 adhesion이 좋고, 박막의 투과성이나 굴절률 등의 광학적 특성이 우수하며, 열적 안정성이 높은 DLC 박막을 증착할 수 있다[5-7]. 또, 아크법은 카본소스로 탄화수소화합물의 기체를 사용하는 것이 아니라 고상의 흑연을 사용하므로 수소 함유를 원천적 방지할 수 있으며, 분위기 가스를 주입을 통하여 제 3원소를 쉽게 첨가할 수 있다는 장점을 가진다.

그러나, 진공 아크 증착법은 그 원리상의 두 가지 문제점으로 인해 오랫동안 연구가 진행되지 못하였다. 이 두 가지 문제점은 'macro-particle'이라 불리는 마이크론 크기의 거대입자 증착과 아크의 불안정성이다. 거대입자의 제거 가능성에 대해서 최초로 보고한 사람은 Morozov로, 자기장을 이용하여 거대입자를 여과할 수 있는 이론적 배경을 제시하였다 [8]. 이 이론에 의거하여 1978년 Aksenov가 magnet filtering 법을 개발하여 거대입자를 여과함으로써 [9],

진공 아크 증착에 대한 연구가 활발히 이루어지게 되었다. 이후 flux tube model등 다양한 이론들이 제시되어졌고 [10,11], 각각 다른 형태의 필터를 도입한 FVAS도 개발되어졌다. 그러나, 자장을 이용한 필터법은 아크 제트의 이송 효율을 크게 떨어뜨리는 문제를 가지고 있다. 즉, 복잡한 빔의 이송 경로로 인하여 방출된 플라즈마 빔 중 일부만 기판에 도달하게 된다. 이송 효율 저하로 인하여 증착율, 증착 면적이 줄어들게 되었고, 덕트와 전자석 등의 필터 장치 부착으로 장비는 복잡해지게 되었다. 대부분의 연구자에 의해 필터링부의 자장은 빔 인출량 및 기판에서의 빔 분포도 달라진다고 보고되고 있으나, 아직까지 체계적인 연구결과는 발표되어 있지 않다.

본 연구 목적은 음극 재료로 고상 카본을 사용하여 수소가 함유되어 있지 않은 순수 탄소 원자만으로 이루어진 비정질 다이아몬드(a-Diamond : a-D)박막의 증착시 기초 연구로서, 자장 여과 방법을 채용한 FVAS의 각 전자석이 빔 인출 특성 및 기판에서의 빔 분포도에 어떠한 작용을 하는지 알고자 하였다. 이를 위해 Taguchi 실험방법 [12]을 이용하였으며, 각 전자석의 전류 변화에 따른 FVAS의 동작 특성을 고찰하였다.

2. FVAS의 구조

그림 1은 자체 제작된 FVAS의 장치도이다 [13]. 음극은 방전 전극용 카본(EDM-3 : POCO co.)로 직경 80 mm의 절두형이며, 보조 양극은 음극으로부터 20 mm 상단에 내경 90 mm의 링으로 되어 있다. 그리고 사용된 전자석은 최대 전류 5 A가 흐를 때, 중심 자장이 각각 소스 전자석은 150 Gauss, 인출, 굽힘, 출구 전자석은 250 Gauss가 되도록 설계하였다. 플라즈마 덕트는 토러스 반경 266 mm, 덕트 반경 80 mm의 스테인레스 스틸을 사용하였으며, 거대입자의 제거를 위하여 60도의 각도로 휘어지게 만들었다. 또한 음극에서 기판으로 거대입자의 직접적인 증착을 방지하기 위하여, 굽어진 덕트에 직렬부를 길이 250 mm로 연장하여 연결하였으며, 굽힘 전자석과 출구 전자석의 자장이 직렬부 내부에 작용하도록 하였다. 그리고 플라즈마 덕트는 바이어

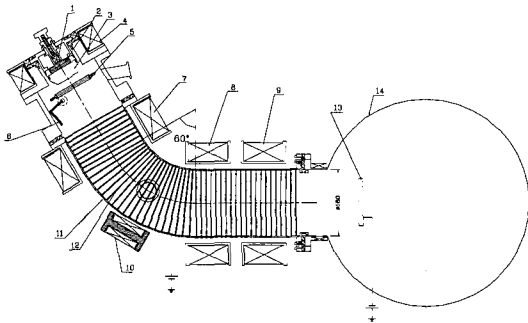


그림 1. FVAS의 전체 도면 : 1) 영구자석, 2) 음극 요크, 3) 음극, 4) 소스 전자석(SM), 5) 양극, 6) 촉발 전극, 7) 인출 전자석(EM), 8) 굽힘 전자석 (BM), 9) 출구 전자석 (OM), 10) 반사 전자석, 11) 플라즈마 덕트, 12) 배플, 13) 기판 홀더, 14) 진공함.

스를 인가할 수 있도록 전기적으로 절연되어있다. 또한 반사 전자석을 플라즈마 덕트의 굽은 부분 가운데 위벽에 설치하였으며, 이것은 인출 전자석과 굽힘 전자석에서 생성된 자기력선의 유출을 방지하기 위해서 자장을 플라즈마 덕트로 밀어 넣는 작용을 하도록 하였다.

3. 실험 방법

제작된 FVAS의 각 전자석들이 a-Diamond 증착에 미치는 역할을 파악하기 위하여, 방전 전류 및 기타 공정 조건은 표 2와 같이 고정시킨 상태에서 4개의 전자석 - 소스 전자석(SM), 인출 전자석(EM), 굽힘 전자석(BM) 및 반사 전자석(DM)- 만을 선택하여 각 전류 변화에 대한 FVAS의 거동을 파악하였다.

Taguchi 실험계획법은 여러 가지 실험 방법이 있으나, 본 연구에서는 변수로 중요한 자석 4가지만을 가지고 실험을 행하므로 L9(3⁴)의 직교배열표를 선택하였다. 실험 변수는 각각의 전자석을 선택하였으며, 수준은 각 전자석에 인가할 수 있는 최대전류 5 A를 기준으로 각각 1 A, 3 A, 5 A의 전자석 전류를 가지도록 배열하였다. 표 1은 이 실험에 사용한 Taguchi 직교 배열표이다. 주요 측정 변수는 아크의 안정성에 영향을 미치는 아크 방전 전압(V_a), 플라즈마의 수송량과 관계되는 인출 이온 빔 전류

표 1. L9 (3⁴)의 직교배열표.

변수	실험 조건				실험 순서	
	SM	EM	BM	DM		
수준 0	1 A	1 A	1 A	1 A		
수준 1	3 A	3 A	3 A	3 A		
수준 2	5 A	5 A	5 A	5 A		
NO	열	A	B	C	D	
1	0	0	0	0	0	4
2	0	1	1	1	1	3
3	0	2	2	2	2	7
4	1	0	1	2	2	1
5	1	1	2	0	0	9
6	1	2	0	1	1	6
7	2	0	2	1	1	2
8	2	1	0	2	2	8
9	2	2	1	0	0	5

표 2. 기본 코팅 공정.

기본 공정 조건	- 초기 진공도 : 5×10^{-5} torr 이하 - 분위기 온도 : 80 °C - 아크 전류 : 30 A - 기판 위치 : 출구로부터 130 mm 떨어진 곳 - 기판 크기 : 직경 115 mm sus판 및 4" Si-wafer - 플라즈마 덕트 바이어스 : DC +50 V
증착 조건	- 공정 진공도 : 2×10^{-4} torr (Ar 주입) - 이온 세정 : 바이어스 DC -700 V, 30 sec - 하지 코팅 : 바이어스 DC -300 V, 30 sec - 정식 코팅 : 바이어스 DC -100 V + AC 25V, 10 min

량(I_b), 그리고 이때의 덕트 전압(V_d)을 측정하였다. 또한 인출 빔의 상태를 알아보기 위하여 코팅을 시행하여 최대 증착 위치 X 및 Y와 이때의 최대 두께(H_p)를 측정변수로 하였다.

표 2는 이 실험에 사용된 초기 공정조건을 제시한 것이다. 측정방법으로는 빔 전류(I_b), 플라즈마 덕트 전압(V_d) 및 전류(I_a), 아크 방전 전압(V_a)은 공정 중 4-ch digital storage-oscilloscope(Dynamic signal analyzer : Hewlett Pachard 35670A)를 이용하여 5분간 데이터를 저장하여 측정하였다. 그리고 공정별 증착량을 측정하기 위하여 4" Si - wafer상에 15 mm 간격으로 격자를 형성시켜 film을 증착하였으며, 증착 후 아세톤으로 세정한 뒤 profilo-meter(a-step : Tenco co.)로 그 격자 사이의 두께를 측정하였다.

4. 결과 및 고찰

실험을 통하여 얻어진 각 측정값들은 다양한 공정 인자와 잡음인자들과 연관되어 있으므로 통상 복잡한 비선형 함수 형태를 갖는다. 이러한 비선형성을 해석하기 위해 Taguchi 방법에 의한 여러 가지 형태의 품질 특성함수를 사용하였으며(표 3), 각 전자석의 효과를 파악하기 위하여 분산분석(ANOVA : Analysis of Variance)을 수행하고, 각 수준별 효과를 그래프로 도시하였다.

표 3. 각 측정값별 특성함수.

특성 함수명	측 정 값
망대 특성	빔 전류(I _b), 플라즈마 덕트 전압(V _d), 증착 두께
망소 특성	방전 전압(V _a)
망목 특성	증착 위치(X 및 Y)

4.1. 아크 방전 전압과 자장과의 관계

아크 방전에서 방전 전압의 증가는 음극에서 양극으로의 전하의 이동이 원활하지 못하여 플라즈마의 저항이 증가하기 때문이다. 이러한 플라즈마의 저항 증가는 아크의 불안정성 증가 및 아크 방전의 소멸을 유발하게 되므로, 적으면 적을수록 아크 방전을 원활하게 해준다. 따라서 본 실험에서는 Taguchi 특성 함수 중 적으면 적을수록 좋은 특성 즉, 망소 특성을 이용하여 평가하였다. 각 전자석에 대한 아크 전압에 미치는 영향을 Taguchi 실험 분석 프로그램을 이용 해석한 것을 표 4 및 그림 2에 나타내었다. 분산분석결과 SM 및 EM만이 유의수준 1%에서 유의하며, 두 인자의 전체 기여율(ρ)은 99.16%로 나타났다(표 5). 이것은 아크의 방전 상태는 대부분 소스 및 인출 전자석에 영향을 받는다는 것을 의미한다.

그림 2에서 소스 및 인출 전자석의 자석 전류가 작을수록 반복실험에서의 산포를 나타내는 값인 SN비가 크고, 거의 두 전자석 전류의 증가에 따라 선형적으로 비례하여 SN가 적어짐을 알 수 있다(방전 전압은 증가함). 따라서 최적의 인자 수준은 SM 1 A, EM 1 A이다. 최적 수준 조합에서의 SN비의 추정치

표 4. 방전 전압에 대한 실험 결과의 SN비 데이터.

		실험 조건				방전 전압 SN비(dB)
변 수		SM	EM	BM	DM	
수 준	0	1 A	1 A	1 A	1 A	SN= -10 LOG{ $\frac{1}{n} \sum y_i^2$ }
	1	3 A	3 A	3 A	3 A	
	2	5 A	5 A	5 A	5 A	
열 NO		A	B	C	D	
	1	0	0	0	0	-27.08
	2	0	1	1	1	-27.63
	3	0	2	2	2	-28.65
	4	1	0	1	2	-28.02
	5	1	1	2	0	-28.94
	6	1	2	0	1	-29.90
	7	2	0	2	1	-29.56
	8	2	1	0	2	-30.37
	9	2	2	1	0	-31.55

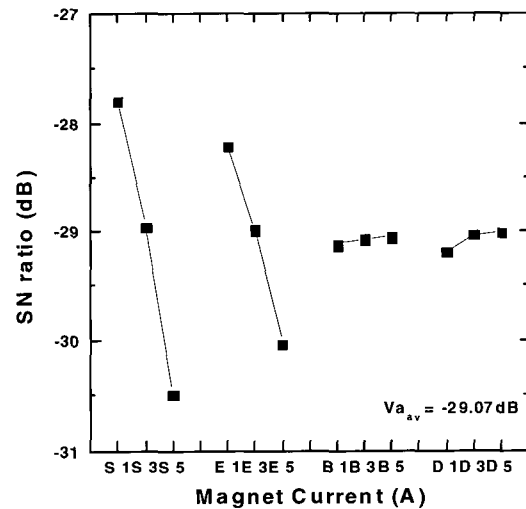


그림 2. 방전 전압에 대한 각 수준별 SN비.

는 식으로부터 구하여 보면,

$$\hat{\mu}(S_1 E_1) = -10 \text{ LOG} \{ \text{추정치}^2 \} = S_1 + E_1 - T = (-27.79) + (-28.22) - (-29.07) = -26.94 \text{ (dB)} \quad (4.1)$$

이다. 즉 방전 전압 - 22.23 V이다. 또한 유의 수준 5%내에서 추정되는 신뢰 구간은

표 5. 방전 전압에 대한 ANOVA 분석.

요인	변동	자유도	분산		분산비		F 표값	순변동	기여율
	S	ϕ	V		F_0		(%)	S'	ρ (%)
SM	11.049	2	5.524		323.229	***	100	11.041	68.53
EM	4.959	2	2.479		145.076	***	99.98	4.924	30.64
BM	0.008	2	0.004	#					
DM	0.060	2	0.030	#					
e'	0.068	4	0.017					0.134	0.83
T	16.071	8						16.071	100.00

$$\begin{aligned}
 CR &= \hat{\mu} \pm t\left(\phi_e, \frac{\alpha}{2}\right) \sqrt{\left(\frac{V_e}{n_e}\right)} \\
 &= -26.94 \pm t(4, 0.025) \sqrt{\frac{0.017}{1.8}} \\
 &= -26.94 \pm 0.27 \text{ (dB)} \quad (4.2)
 \end{aligned}$$

이다. 즉 -22.94 V ~ -21.55 V이다.

음극 표면에서의 자장의 증가는 아크 스팟의 운동을 음극 표면의 가장 자리로 이동시켜, 플라즈마 저항을 증가시키며 더불어 아크 방전의 불안정성을 증대시킨다. 소스 전자석의 자장이 증대되면 음극 표면에서의 아크 스팟은 점점 중심에서 가장자리로 이동한다. 소스 전자석이 자장이 0이거나 작다면 아크 스팟은 음극 표면의 중심부에서만 작용하여 생성된 플라즈마가 기관까지 잘 수송되기는 하나, 음극의 중심부만 증발이 발생되어 음극의 사용효율을 떨어뜨린다. 따라서 아크 방전 전압은 단지 아크의 안정화 측면에서 필요 조건이긴 하지만, FVAS의 효율적 플라즈마 인출측면에서 필요 충분 조건은 아니다. 이 부분에 대한 더 자세한 실험은 음극 증발부 부근에서 음극의 안정적 사용 측면에서 나중에 다루도록 할 것이다.

4.2 플라즈마 덕트 전압과 전자석과의 관계

음극에서 발생된 하전입자들은 플라즈마 덕트를 통하여 기관까지 수송된다. 그리고 제작된 플라즈마 덕트는 전기적으로 접지에 대하여 절연되어 있고, 독자적인 바이어스 전압의 부가가 가능하도록 제작되었다. 따라서 이 플라즈마 덕트는 걸여준 바이어스 전압의 변화를 통하여 간접적으로 덕트 내부의 플라즈마 상태를 알 수 있는 전기적인 Probe

의 역할을 수행하고, 또한 FVAS의 실제적인 양극 역할을 동시에 수행한다.

실험에 사용한 플라즈마 덕트 바이어스 전원은 DC 100 V - 10 A급이다. 실험은 공정 전에 플라즈마 덕트의 바이어스 전압을 DC +50 V를 인가하였으며, 공정을 시행하면서 덕트에 흐르는 전압 및 전류의 변화를 측정하였다. 전압은 -10 V ~ +46 V까지, 그리고 덕트에 흐르는 전류는 6.8 A ~ 9.0 A까지 변화하였다. 이는 정전압 정전류 모드의 전원을 사용한 결과로 플라즈마 덕트 내벽으로 과도한 전자나 이온이 충돌할 때, 나타나는 플라즈마 포텐셜의 변화로 생각된다.

그림 3(a)는 전자석 전류의 변화에 대한 덕트 전압과의 관계를 SN비가 아닌 실제 수치로 도시한 것이다. 소스 전자석 전류가 감소할수록 덕트 전압은 증가한다. 소스 전자석에 의한 플라즈마 덕트 전압의 변화는 음극에서의 아크 스팟의 위치와 관계가 깊다. 현재 제작된 FVAS에서 음극 스팟의 위치는 소스 전자석의 자장이 증가할수록 음극의 중심에서 가장자리로 이동할 확률이 높다. 따라서 소스 전자석의 전류가 증가되면, 아크 스팟은 음극의 가장자리에 위치하게 되고, 따라서 플라즈마 덕트로의 유입시 고 밀도의 플라즈마는 덕트의 중심부에서 벗어난 위치에서 입사하게 된다. 이것은 특히 플라즈마 덕트의 자장이 낮을 때(인출 및 굽힘 전자석의 전류가 낮을 때) 덕트의 굽어진 부분에서 덕트와 충돌하여 전자 및 이온이 손실될 확률이 높은 것을 의미한다. 따라서 그림 3(a)에서 동일한 아크 방전 전류와 진공도 하에서 덕트 전압의 크기를 증가시키는 조건은 소스 전자석의 전류가 작고, 인출 및 굽힘 전자석 전류가 클 때이다. 가장 높은 덕트 전

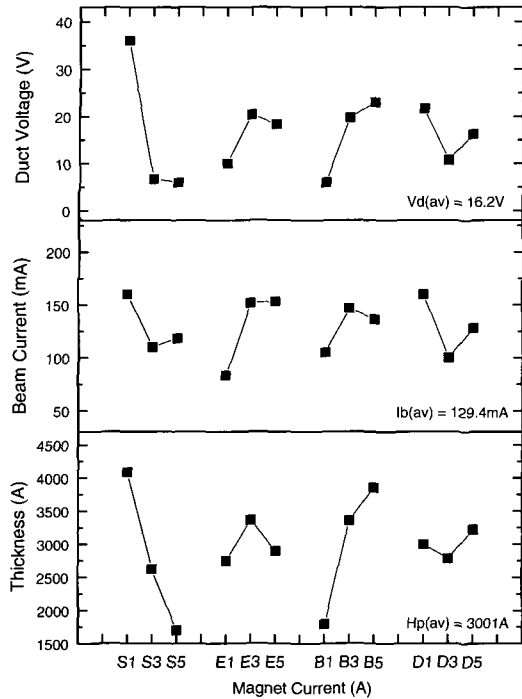


그림 3. 각 전자석과 특성치와의 관계 (a) 덕트 전압, (b) 인출 빔 전류, (c) 증착 두께.

압을 유지 시키는 조건은 S1 E3 B5의 조건으로 예상되는 덕트 전압은 47 V, 8.2 ~ 9.2 A 이다.

4.3 인출 빔 전류와 전자석과의 관계

그림 3(b)는 전자석 전류의 변화에 대한 인출 빔 전류의 변화를 실제 수치로 도시한 것으로서 인출 빔 전류의 크기는 인출 전자석의 영향을 가장 많이 받는 것을 알 수 있다. 그리고 소스 전자석 전류에 대하여 빔 전류는 반비례 관계를 가지는데 이것은 앞의 덕트 전압의 강하와 같은 방법으로 해석이 가능하다. 또한 굽힘 전자석에 대해서는 증가하다가 감소하는 경향이 있다. 이것은 뒤에서 설명할 최대 증착 위치의 변화와 연관시키면 쉽게 설명할 수 있다. 인출 빔 측정에 사용된 기관은 직경 115 mm의 원판이므로, 굽힘 전자석 전류가 특정치 이상으로 증가하면, FVAS에서 인출되는 빔의 최대점은 기관의 가장자리로 이동할 것이다. 따라서 인출되는 빔은 많지만, 사용된 기관의 크기가 작기 때문에 실제 인출되는 전체적인 빔 전류를 측정하기 못하기 때

문이다. 이 실험에서 빔 전류의 크기는 35 mA ~ 220 mA까지 변화하였다. 아크 방전 전류 30 A에서 현 실험 조건에서 최대 측정할 수 있는 빔 전류량은 S1 E3 B3 D1에서 약 232 mA로 추정된다. 또한 반사전자석은 인출 전자석과 굽힘 전자석의 전류가 각각 3 A 이상으로 증가하면 빔 인출에 영향을 미치지 않는다.

4.4 증착 두께와 전자석과의 관계

그림 3(c)는 전자석 전류가 시편의 증착 두께에 미치는 영향을 도시한 것이다. 기관의 증착량은 소스 전자석에 대하여 선형적으로 감소하고, 굽힘 전자석에 대하여 선형적으로 증가됨을 알 수 있다. 증착량이 소스 전자석에 대하여 감소하는 이유는 음극 표면에서의 아크 스팟의 유동이 자장이 증가함에 따라 점점 음극 표면의 중앙에서 가장 자리로 이동함으로 음극에서 플라스마 덕트로 입사하는 플라스마의 직경이 점점 커져, 대부분 입사한 이온이 수송 중 플라스마 덕트의 내벽과 충돌하여 효율적인 수송이 이루어지지 못한 결과이다. 예상되는 최대 증착 두께는 S1 E3 B5에서 약 5300 Å이다.

4.5 최대 코팅 위치와 전자석과의 관계

특정 위치에서의 최대의 증착률 또는 전류 밀도를 얻기 위한 실험에서의 다푸치 실험을 통한 특성 평가는 망목 특성을 이용한다. 망목 특성의 평가는 각 조건에서의 위치의 평균값과 SN비 두 가지로 평가하여야 한다. 여기서 SN비는 반복실험에서의 산포를 나타내는 것으로 SN비가 클수록 좁은 범위에 최대점이 모여 있다는 것을 의미한다. 그리고 각 실험 조건에서 위치의 평균값은 원하는 위치로 peak point를 움직일 수 있는 위치 조정인자의 역할을 수행한다. 그림 4는 각 전자석에 따른 X, Y의 변위에 대한 평균값 및 SN비의 기여도를 표시하였다. 그림 4(a)와 (c)에서 공정 조건에 따라 최대점의 이동은 Y축 방향으로의 변화량 보단 X축 방향으로의 변화가 3 배 이상 큼을 알 수 있다. 실제 실험에서 Y축 방향의 최대 코팅 위치의 변화량은 24 mm 정도였으나, X축 방향의 최대 코팅 위치의 변화량은 100 mm였

자장여과 아크 소스에서 각 전자석이 플라즈마 인출에 미치는 영향

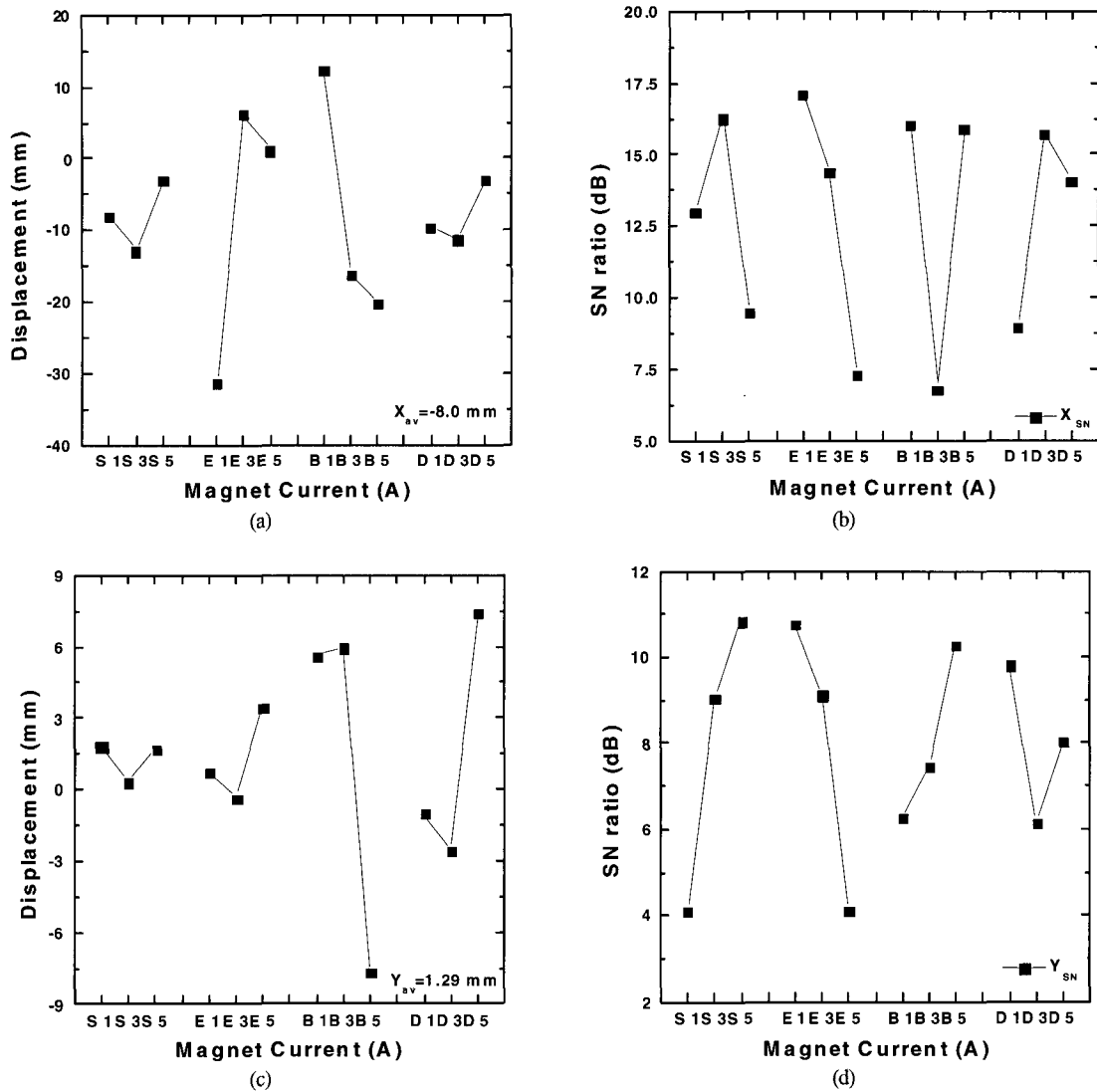


그림 4. 각 전자석에 대한 최대 코팅 위치의 변화 (a) X 변위의 평균값, (b) X 변위에 대한 SN비, (c) Y 변위의 평균값, (d) Y 변위에 대한 SN비

다. 공정 시, 시편 장착에 의한 오차는 Y축은 0이 나, X축은 오차를 20 mm로 보더라도 각 전자석의 전류에 따라 많은 변화를 보임을 알 수 있다. X 방향의 산포를 제어하는 인자는 모든 전자석이 다 관계를 하고, 위치를 제어하는 인자는 평균값 변화가 가장 큰 인출 및 굽힘 전자석이다. 따라서 본 실험에서는 소스 및 반사 전자석을 사용하여 산포를 제어하고, 인출 및 굽힘 전자석을 제어하여 원하는 위치로 박막의 최대점을 조절하는 것이 좋을 수

있었다. 또한 Y 방향은 산포 제어 인자와 위치 제어 인자가 각각 소스 및 인출 전자석과 굽힘 및 반사 전자석으로 쉽게 나눌 수 있다.

4.6 전자석의 동작 특성 평가

측정한 모든 물성치에서 소스 전자석 전류는 낮을수록 좋은 특성을 나타내었다. 이것은 현 제작된 FVAS의 자장 구조하에서 아크 스팟이 얼마만큼 안

표 6. 각 특성치별 최적 및 최악 조건.

특성치	최적 조건	예상 최적 조건	예상 최악 조건
덕트 전압	S1 E3 B5	S1 E3 B3	S5 E1 B1 D3
빔 전류	S1 E5 B3	S1 E3 B5	
증착 두께	S1 E3 B5	S1 E5 B3	

정적으로 움직이는 가와 관계가 깊다. 표 6은 각 특성치별 최적 및 최악의 전자석 전류의 조건을 나타낸 것이다. 예상 최적 조건에서 덕트 전압, 빔 전류, 증착 두께는 각각 41.6 ~ 47 V, 189.6 ~ 201.2 mA, 4335 ~ 5302 Å의 범위를 가진다. 각각 5 %의 오차 범위 내에 들어오며, 실제 FVAS의 특성에서 중

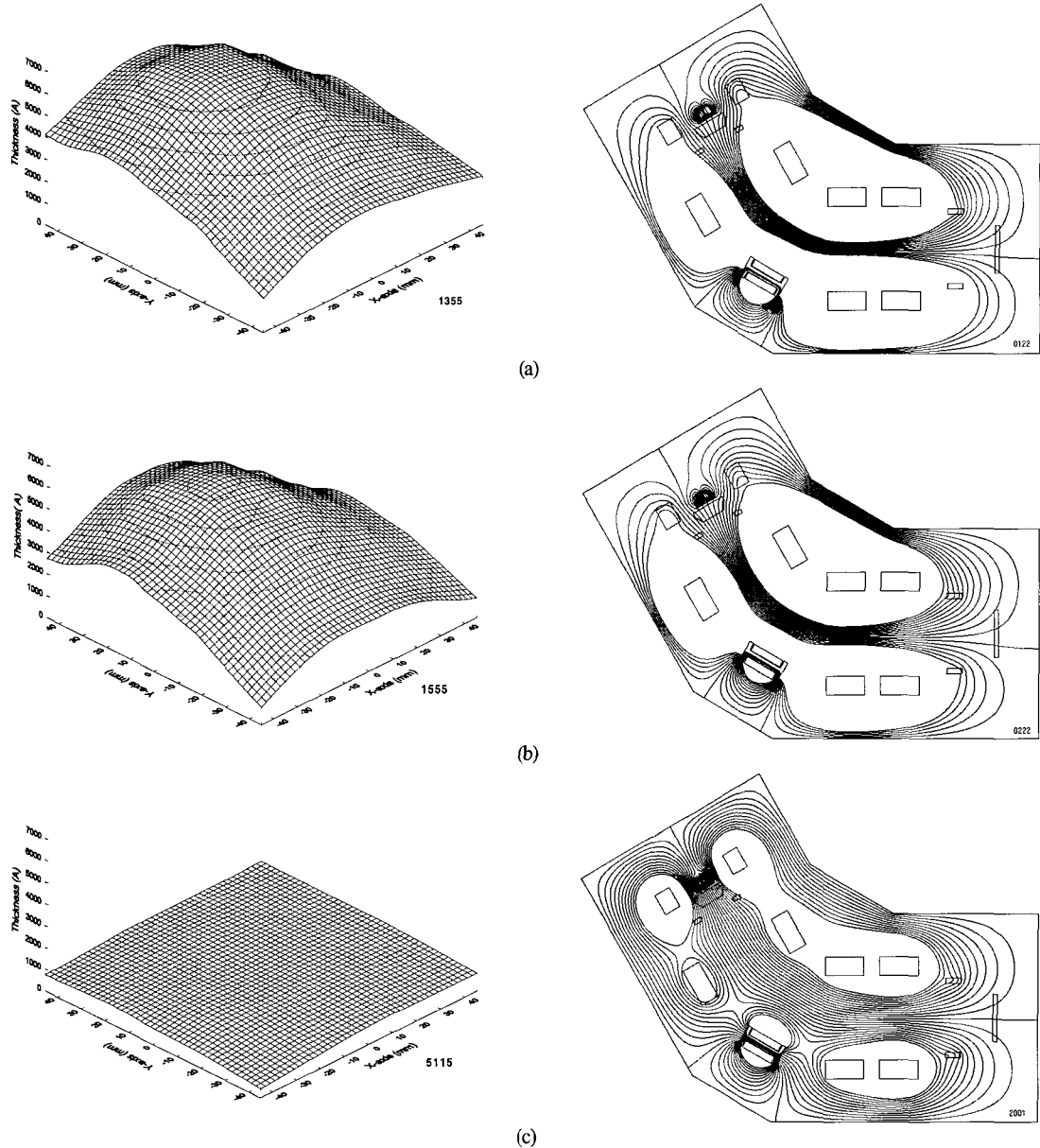


그림 5. 예상 최적 · 최악 조건별 박막의 증착 분포 및 자기력선 분포(a) 예상 최적 (b) 조건내 최적 (c) 최악

요한 특성은 증착 두께이므로 이것을 기준으로 최적 조건을 산출하면 S1 E3 B5 D5이다. 따라서 현재 공정에서의 최대 증착 두께를 낸 공정 즉 S1 E5 B5 D5와 산출된 공정 S1 E3 B5 D5를 가지고 재현성 실험을 행하였다. 이때 거의 비슷한 증착률을 나타내었으나, 아크 방전의 안정적 측면에서 볼 때, 인출전자석(EM) 전류가 3 A일 때가 더 효과적이었다. 또한 가장 최악의 조건은 S5 E1 B1 D3로 나타났는데, 이것은 음극에서의 아크 불안정성과 인출 및 굽힘 전자석에 의한 빔 수송효율이 떨어진 결과이다. 이러한 결과의 원인은 그림 5에 표시된 각각의 조건에 따른 박막의 두께 분포 및 자장수치모사코드(Poisson code)에 의한 2차원적인 자기력선 분포를 보면 쉽게 이해할 수 있을 것이다. 각 전자석들에 의한 자기력선 분포가 필터링 부위에 집중되도록 공정을 시행하는 것이 빔 수송 효율적 측면이나 기판에서의 필름 증착률 측면에서 효과가 좋은 것을 알 수 있었다. 향후 기판에서의 필름 균일도 문제는 출구 전자석 부근에서의 빔을 자기적으로 흔들어 주는 것으로 해결 가능할 것 같다.

5. 결 론

본 실험에서는 설계 제작한 자장 필터 아크 증발원(FVAS)의 각 전자석이 음극표면 및 플라즈마의 수송에 어떠한 작용을 하는지를 Taguchi 실험계획법을 이용하여 평가하였다. 소스 및 인출 전자석은 음극 표면에서의 아크 스팟의 운동을 제어하는 역할을 하며, 소스의 전자석 전류가 낮을수록 아크 스팟은 음극 표면의 중심에서 움직여 음극의 사용 효율을 나쁘게 하나, 플라즈마 덕트를 통한 수송효율을 증대되었다. 하지만 소스 전자석의 전류가 증가하면 음극 스팟은 점점 음극표면의 중심에서 가장 자리로 이동하여 결국에는 음극의 외곽에서 증발을 유도하여, 아크의 불안정성을 야기 시켰으며, 또한 플라즈마 덕트를 통한 수송 효율도 떨어뜨렸다.

굽힘 전자석은 증발부로부터 인출된 플라즈마를 원하는 각도로 플라즈마를 유도하는 작용을 하였으며, 이 자장을 인출 전자석과 상호 연관 관계를 가지며 플라즈마에 영향을 미쳤다. 출구 전자석은 휘어져 나온 플라즈마를 기판까지 안정하게 유도하는 작용을

한다. 하지만 플라즈마 덕트의 굽은 부분에서의 자장을 플라즈마 덕트 쪽으로 밀어 플라즈마의 손실을 줄이고자 부착한 반사 전자석은 최소한의 자장 전류만 인가되면 그 효과가 없는 것을 알 수 있었다.

따라서 소스 전자석의 전류가 낮을수록, 그리고 플라즈마 덕트 주위의 전자석의 전류가 높을수록 증착률은 증대하였으며, 빔 수송 효율의 안정성 및 필름 증착률은 1×10^{-4} torr이상의 진공도에서는 빔 전류에 비례하기보다는 플라즈마 덕트에 유지되는 전압에 많은 상관관계가 있었다. 본 실험의 범위에서 나타난 최적의 빔 인출 및 증착 조건은 소스, 인출, 굽힘, 반사 전자석의 전류는 1 A, 3 A, 5 A, 5 A로 나타났다.

참 고 문 헌

- [1] Kwang-Ryeol Lee and Kwang-Yong Eun, 'Diamond-like Carbon Film', Bull. of the Korean Inst. of Met. & Mater. **6**(4), 345 (1993).
- [2] D. A. Baldwin, S. Falabella, Livermore 38th Annual Technical Conference proceedings (1995), Society of Vacuum Coaters 505/856-7188.
- [3] C. B. Collins, Appl. Phys. Lett. **54** 216 (1989).
- [4] T. Sato, S. Furno, S. Iguchi, and M. Hanabusa, Appl. Phys. A **45** 355 (1988).
- [5] H. C. Miller, J. Appl. Phys., **52** 4523 (1981).
- [6] G. M. Pharr, D. L. Callahan, S. D. McAdams, T. Y. Tsui, S. Anders, A. Anders, J. W. Ager III, I. G. Brown, C. S. Bhatia, S. R. P. Silva and J. Robertson, Appl. Phys. Lett. **68**(6) 779 (1996).
- [7] B. K. Tay, X. Shi, H. S. Tan, H. S. Yang and Z. Sun, Surf. Coat. Technol. **105** 155 (1998).
- [8] A. I. Morozov, Sov. Phys. Dokl., **10** (1966) 775.
- [9] I. I. Aksenov, V. A. Belous, V. G. Padalka and V. M. Khoroshikh, Sov. J. Plasma Phys. **4**(4) 425 (1978).
- [10] R. C. Davidson, Phys. Fluids **19**, 1189 (1976).
- [11] V. S. Veerasamy, G. A. J. Amaratunga and W. I. Milne, IEEE Trans. Plasma Sci. **21** 322 (1993).
- [12] 박성현, '품질 공학' 민영사 (1995).
- [13] 김종국, 남승호, 최병룡, 대한민국특허, 등록번호 0230279 (1999).