

다구찌 강건 설계를 통한 반도체 Probe상 Ti 도핑된 DLC(ta-C:Ti) 코팅 막의 전도성 및 기계적 물성 연구

김도영¹ · 신준기² · 장영준³ · 김종국^{3*}

¹한국기술교육대학교 에너지신소재화학공학부 학부생

²부산대학교 바이오산업기계공학과 학부생

³한국재료연구원 극한소재연구소 극한환경코팅연구실 책임연구원

Conductive and Mechanical Properties Study of Ti-doped DLC (ta-C:Ti) Film on Semiconductor Probe through Taguchi Robust Design

Do-young Kim¹, Jun-ki Shin², Young-Jun Jang³ and Jongkuk Kim^{3*}

¹Undergraduate Student, Dept. of Energy, Materials & Chemical Engineering, Korea University of Technology and Education, Korea

²Undergraduate Student, Dept. of Bio-industrial Machinery Engineering Pusan National University, Korea

³Principal researcher, Korea Institute of Materials Science (KIMS), Korea

(Received December 6, 2022; Revised December 20, 2022; Accepted December 21, 2022)

Abstract – There is a problem that semiconductor probe pin has a short lifespan. In order to solve this problem, Ti having excellent conductivity was doped to tetrahedral amorphous carbon (ta-C) having excellent hardness and abrasion resistance. This experiment was planned through the Taguchi robust design to determine the effect of the control factor of the ta-C:Ti coating film. The effect and contribution of control factors such as Unbalanced Magnetron Sputter(UBM) discharge current, arc discharge current, temperature, and bias voltage on ta-C:Ti characteristics were analyzed from the perspective of electrical and mechanical characteristics. The UBM discharge current was set to 4, 6, and 8 A. The main control factor of thickness and resistance is the UBM discharge current, and the thickness increased and the resistance decreased as the current increased. The decrease in resistance is due to the increase in the Ti content of the ta-C:Ti coating film. The arc discharge current was set to 60, 80, and 100 A. The main control factor of hardness and wear is the arc discharge current, and as the current rises, the hardness increases and the wear area decreases. This is due to the increased ta-C content of the ta-C:Ti coating film. Since resistance and wear are important for Probe Pin, the optimal level is set from the perspective of resistance and wear and a confirmation experiment is conducted.



© Korean Tribology Society 2022. This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License(CC BY, <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction of the work in any medium, provided the original authors and source are properly cited.

Keywords – Taguchi robust design(다구찌 강건 설계), ta-C:Ti(Ti 도핑 ta-C), Conductive(전도성), Hardness(경도), wear(마모)

*Corresponding author: Jongkuk Kim
Tel: +82-55-294-9500 Fax: +82-55-280-3570
E-mail: kjongk@kims.re.kr
<https://orcid.org/0000-0001-7389-3207>

1. 서 론

최근 반도체 제조공정에서 패턴 회로의 선폭 (Line Width)

이 미세화 됨에 따라 완성된 패턴 웨이퍼 내 반도체 칩의 기능과 신뢰성을 확인하기 위한 검사 작업이 증대되고 있다. 이때, 검사는 반도체 소자에 임계에 가까운 전압 (3 V)을 가한 상태에서 제품을 동작시키고 작은 Probe Pin을 접촉시켜 발생하는 전기신호를 검출하여 불량 여부를 판별하는 방식으로 이루어진다[1]. 현재, 검사용 Probe Pin은 Copper-Beryllium (Cu-Be) 모재 상 Nickel/Gold (Ni/Au) 전기도금 (Electroplating) 공정을 거쳐 사용되고 있다[1-3].

이는, 통전 검사가 가능한 수준의 성능을 만족하지만, 메모리 소자 집적도 상승과 검사 시간 증대에 따른 Probe의 내마모성, Tin (Sn) 내소착성으로 인한 내수명성 저하 문제는 반드시 해결해야하는 기술적 이슈로 작용한다.

따라서, 본 연구에는 여러 가지 이유로 제작된 상용 Probe Pin의 전기전도성과 내수명성 향상을 위해 Titanium (Ti) 금속물질 도핑을 통한 전도성 다이아몬드 상 카본 막 (Diamond-like carbon, DLC)을 이용하고자 하였다. 이 물질을 선정할 목적은, DLC는 다이아몬드의 고경도 특성을 갖는 sp³ 결합과 흑연의 저마찰 특성을 갖는 sp²의 혼성 결합으로 고경도, 저마찰 특성을 동시에 갖는다[4].

그 중, 사면체 비정질 카본 (Tetrahedral amorphous carbon, ta-C)은 sp³ 분율이 40% 이상으로 수소가 포함되지 않는 DLC 막을 뜻한다[4]. ta-C 코팅 막은 우수한 기계적 물성과 내마모성 및 이형성으로 Sn과 내소착성이 우수한 물질이다. Ti는 전기전도성이 우수하며, 계면접착에서 대표적인 응착력 증진 물질으로 코팅 막의 내부응력제어 및 DLC 코팅 막 구조 내에 sp² 함량을 증진시켜 전기전도 및 저마찰 특성을 향상시키는 요소가 되기 때문이다[5-7].

코팅 막에 영향을 미치는 다양한 변수들이 있으며, 각 변수를 동시에 제어할 경우 변수 간 상호작용에 대한 고려와 각 변수의 영향력에 대해 파악하기 어렵다 [8]. 본 연구에서는 다구찌 강건 설계 (Taguchi robust design)를 이용하여 제어인자 중 UBM (Unbalanced Magnetron Sputter) 방전 전류를 조절하여 전도성 변화, 아크 방전 전류를 조절하여 경도 변화 그리고 온도 및 바이어스 전압 조절을 통한 기계적 물성 변화를 통해 막의 물성에 미치는 영향을 파악한다.

제어인자 중 주된 인자를 도출하여 전도성 및 내마모성이 우수한 최적 공정 조건을 수립하여 반도체 Probe에 적용할 수 있는 적합한 코팅 막 제작을 목표로 하였다.

2. 연구방법 및 내용

2-1. 다구찌 강건 설계

다구찌 강건 설계란, 적은 실험 횟수의 사용으로 비용을 올리지 않고 균일한 품질의 최적 조건을 찾는 실험 방법이다. 산포의 최소화를 우선적으로 고려하며 신호 대 잡음 비 (Signal-noise ratio, SN비) 환산 처리를 통해 각 인자의 영향을 평가하고, 목표치에 따른 최적 공정 조건을 도출하는 과정으로 진행된다[9-10].

본 연구에서 사용한 막에 대한 물성 평가 특성치는 수치형 정 특성치로 목표치가 항상 일정하며, 목표치에 따라 망소와 망대특성이 있다[11]. 저항과 마모량은 특성치가 작을수록 좋은 경우로 망소특성 (Small-the-better characteristic), 경도는 특성치가 클수록 좋은 특성으로 망대 특성 (Large-the-better characteristic)으로 설정하였다 [12-14].

ta-C:Ti 코팅 막의 두께 또한 망대특성으로 설정하였다. 평가 특성에 따라 손실함수 SN비 분산분석을 통해 코팅 막의 물성에 미치는 영향과 기여도를 살펴보았다.

2-2. 코팅 막 물성에 따른 실험 계획

Table 1의 직교 배열표는 부분 실험법 (Fractional factorial experiment)에 근거하여 최소한의 실험으로 전조합 실시

Table 1. Orthogonal array of Taguchi method (L9)

Factor	Control parameter			
	A	B	C	D
	UBM Current [A]	Arc Current [A]	Temperature [°C]	Bias Voltage [V]
Level				
1	4	60	80	0
2	6	80	100	50
3	8	100	120	100
Experimental No.				
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	1
7	3	1	3	2
8	3	2	1	1
9	3	3	2	1

법 (Full factorial experiment)의 효과를 갖는 장점이 있으며, 제어인자와 수준 및 교호 작용 존재 여부에 따라 결정된다[11].

본 실험에서는 코팅 막의 전도성에 영향을 미치는 UBM 방전 전류 (A), 기계적 물성에 영향을 미치는 아크 방전 전류 (B), 온도 (C), 바이어스 전압 (D)을 제어인자로 설정하고, 각 제어인자를 3 수준으로 설정하였다. 그리고 교호작용은 고려하지 않아 L9 직교 배열표를 작성하였다.

2-2-1. UBM 방전 전류

UBM 방전 전류의 상승에 따라 Ti 타겟으로 높은 에너지 이온 충돌이 발생하고 이는 스퍼터링 증착률을 상승시킨다. UBM과 FCVA (Filtered cathodic vacuum arc) 동시 방전을 통해 ta-C:Ti 코팅 막을 증착할 경우 UBM 방전 전류의 상승은 코팅 막의 Ti 함량을 증가시킨다[6]. 이는 코팅 막의 전도성 변화 요인으로 작용한다.

기초실험을 통해 UBM 방전 전류는 6 A에서 12.5 nm/min, 8 A에서 16.7 nm/min으로 전류 상승에 따라 증착률이 선형적으로 증가하는 것을 확인하였다. 이를 바탕으로 Ti 함량 조절을 통한 전도성의 변화를 분석하기 위해, 제어인자 UBM 방전 전류의 수준을 4, 6, 및 8 A로 선정하였다.

2-2-2. 아크 방전 전류 및 온도

ta-C 코팅 막은 아크 방전 전류의 변화로 이온에너지의 크기가 변화하며, 이는 코팅 막의 기계적 물성을 좌우한다. 방전 전류의 상승으로 입사되는 카본 플라즈마 Flux 가 증가한다. 카본 플라즈마 Flux 의 증가는 기판 온도의 상승으로 이어져 코팅막의 기계적 물성을 변화한다.

ta-C 코팅 막의 경우, 아크방전 전류가 60, 80, 및 100 A로 증가 시 경도는 순차적으로 감소한다고 연구되었으며[15], 온도 또한 50, 100, 150°C 순으로 증가 시 경도 감소로 이어진다고 연구되었다[16]. 그리고 기초 실험을 통해 아크 방전 전류가 60 A에서 100 A로 증가 시 증착률이 4 nm/min 에서 6.7 nm/min 으로 증가함을 확인하였다. 이를 바탕으로 제어인자 중 아크 방전 전류는 60, 80, 100 A, 온도는 80, 100, 및 120°C로 수준을 선정하였다.

2-2-3. 기판 바이어스 전압

FCVA 증착법으로 기판 바이어스의 전압 인가에 따라 기판에 도달하는 이온에너지를 제어할 수 있다. 기판 바이어스 전압의 증가는 조밀한 막을 형성하며 기계적 물

성을 변화시킨다[17-18].

ta-C 코팅 막의 경우, 기판 바이어스 전압을 50, 150, 및 250 V 순으로 증가 시 경도 감소로 이어진다고 연구되었다[19]. 이를 바탕으로 기판 바이어스 전압을 0, 50, 및 100V로 수준을 선정하였다.

2-3. 평가 시편의 준비

본 실험에서는 두께 525 μm , 결정 방향 <111>, 가로 및 세로 길이 20 mm 인 정사각형 Si-Wafer를 평가 시편으로 선정하였으며, 알코올로 시편 세척 후 Fig. 1에 도시한 진공시스템에서 공정을 진행하였다.

챔버 내부의 수분 및 이물질 제거를 위해 120 °C로 가열 이후 10^{-2} Pa 에서 공정을 시작하였다. 시편은 공전 및 자전으로 회전하여 공정 실시하였으며, Table 2에 기재한 세부 공정 조건에서 Table 1의 직교 배열표의 조건을 따라 진행하였다.

ta-C:Ti 막을 증착하기 위한 공정 과정은 3단계가 있다. 먼저 이온 소스를 사용하여 표면 산화 막 및 불순물 제거를 위한 이온세정 공정, UBM 을 사용하여 밀착력 향상을 위한 Ti 중간층 증착 공정이 있으며, 마지막으로 마그네트론 스퍼터와 FCVA 동시 방전을 통한 ta-C:Ti 증착으로 구성된다.

2-4. ta-C:Ti 박막의 특성 평가

코팅 막의 평가 특성치로 ta-C:Ti 박막의 두께, 저항, 경도 그리고 마모량으로 선정하였다. 박막 두께의 경우 공초점 현미경 (Olympus LEXT OLS5100, Japan)을 통해 증착된 박막의 두께를 측정하였다. 저항은 디지털 멀티테스터기(삼광전자 SK-104, Korea)를 사용하여 10 mm 간격으로 측정하였으며, 경도는 테이블 탑 나노 압입 시험기 (Anton-paar NHT3, Austria)를 사용하여 5 mN의 압입하중으로 측정하였다.

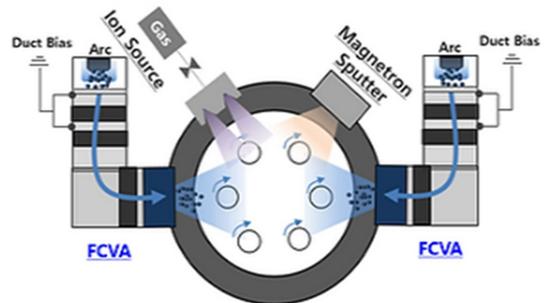


Fig. 1. Schematic illustration of FCVA coating system.

Table 2. Experimental conditions of ta-C:Ti film coating process

Process	Experimental Condition	Temperature	Bias Voltage
Ion cleaning	Discharge voltage : 2.0 kV Discharge current : 370 mA Flow rate of Ar gas : 42 sccm	120°C	0 V
Ti Buffer	Discharge current : 6 A Flow rate of Ar gas : 150 sccm		
ta-C:Ti	Discharge current : 4 A, 6 A, 8 A Arc current : 60 A, 80 A, 100 A Flow rate of Ar gas : 100 sccm	80°C, 100°C, 120°C	0 V, 50 V, 100 V

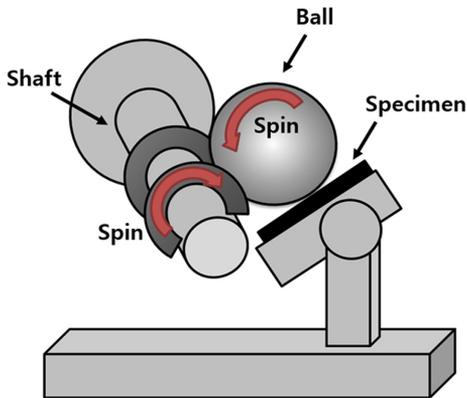


Fig. 2. Schematic illustration of calo tester [20].

한 칼로 테스터를 사용하여 마모 평가를 진행하였다.

Fig. 2와 같이 칼로 테스터에 시편을 고정 후 시편과 샤프트 사이에 볼을 배치하였다. 샤프트 회전이 볼을 회전시키며, 회전하는 볼은 시편의 코팅 막을 마모한다. Fig. 3(a)와 같이 코팅 막 두께의 1/2로 충분히 마모되며, 코팅 막이 뜯겨나가지 않는 정도인 20 rpm, 20 sec로 기준을 설정하여 마모시험을 진행하였다.

이후 Fig. 3(b)와 같이 공초점 현미경으로 마모가 진행된 크레이터를 관찰한다. 마모 면적 측정을 통해 마모량 평가와 칼로 테스터를 사용한 마모량 평가의 가능성 확인을 진행하였다.

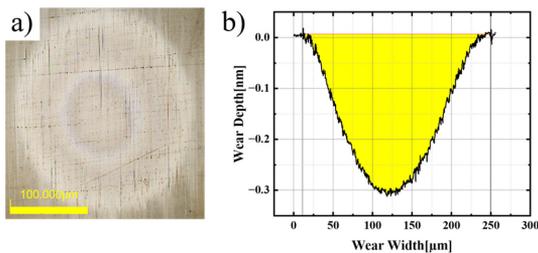


Fig. 3. Image of (a) after wear of coating film, (b) wear area measurement.

마모량은 칼로 테스터(J&L Tech Calo Tester, Korea)를 사용하였으며, 직경 20 mm 볼을 샤프트 회전속도 20 rpm, 회전 시간 2 sec로 설정하여 측정하였다. 칼로 테스터는 일반적으로 코팅된 시편에 볼을 회전하여 원형 크레이터 분석을 통해 코팅 막의 두께 측정과 막의 다층 구조 확인 시 사용된다[20]. 일반적으로 사용하는 핀온디스크 마모시험기의 경우 마모량 측정 시 시간이 장시간 소모된다는 단점으로, 본 실험에서는 급가속 마모시험이 용이

3. 결과 및 고찰

3-1. 실험 계획법을 통한 주요 인자 별 상관관계

3-1-1. ta-C:Ti 증착 두께

Table 3의 직교배열표를 통해 진행한 실험의 평가 측정치를 도시하였다. ta-C:Ti 코팅 막 증착 두께를 망대 특성치로 분산 분석하여, 각 제어인자와 수준에 대한 그래프인 Fig. 4와 기여도 그래프인 Fig. 5가 도출되었다. 증착 두께의 기여도는 Fig. 5(a)에 도시한 바와 같이, A 인자인 UBM 방전전류가 90.7%로 가장 높은 기여율을 갖는다. Fig. 4(a)에서 수준이 증가함에 따라 두께가 증가하고, 3수준에서 가장 높은 두께가 측정되었다.

이는 UBM 방전 전류가 증가할수록 스퍼터링 증착물인 Ti 증착률이 상승한 것으로 사료된다. B인자 아크 방전 전류의 경우, Fig. 4(a)의 수준이 증가함에 따라 두께가 증가하며, 3 수준에서 최댓값이 측정되었다.

UBM 방전 전류와 아크 방전 전류 모두 방전 전류 상승에 따라 증착 두께가 증가하지만, UBM 방전 전류의 높은 기여율로 ta-C:Ti 코팅 막의 Ti 함유량이 ta-C 함유량보다 많을 것으로 추정된다. 다시 말해, Ti에 ta-C가 도핑된 막이 형성된 것으로 사료된다.

Table 3. Results of evaluation regarding to Orthogonal array(L9)

Exp. No.	ta-C:Ti Thickness [nm]	Resistance [Ω]	Hardness [Gpa]	Wear Area [μm^2]
1	415.3	21.5	11.6	21.2
2	390.1	19.2	10.3	14.8
3	430.1	15.8	11.6	12.1
4	494.8	12.3	9.4	18.9
5	661.5	18.0	10.0	16.1
6	641	13.3	11.9	13.3
7	770.5	7.5	9.2	23.6
8	753.4	7.8	10.7	12.1
9	870.6	11.9	11.4	8.8

Fig. 4(a)에서 기여율이 낮은 B, C, D 인자는 증착두께에 미치는 영향이 없는 것으로 판단하였다. 이때 유의미한 결과 도출을 위해 Table 5에 기여율 및 최적 조건과 최적 값을 도출하였다. 기여율은 Table 4에 도출된 평가 특성치에 대한 SN비를 환산과 변동 항을 통해 계산 후 백분율로 표현하였다. 이때 증착두께에 영향이 없다고 판단한 B, C, D 인자를 제외(풀링)하고 A 인자에 대하여 최적조건과 최적 조건의 추정치를 A₃(8 A), 796.3.0 nm 로 도출하였다.

3-1-2. 저항

직교 배열표의 저항 측정치를 망소 특성치로 분산 분석하여 Fig. 5(b)에서 A 인자가 가장 높은 기여율을 갖는다. Fig. 4(b)에서 A 인자가 증가함에 따라 저항이 감

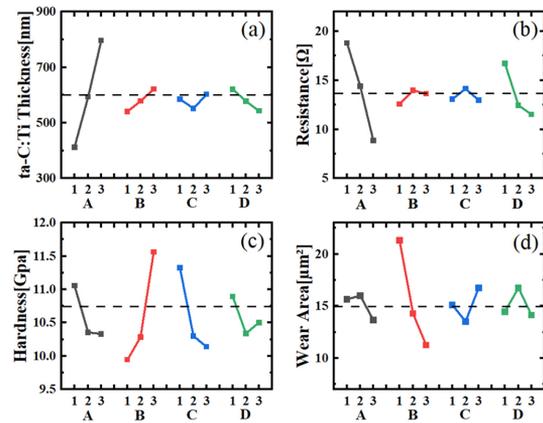


Fig. 4. Values plots of (a) ta-C:Ti thickness, (b) resistance, (C) hardness, (D) wear area. for 4 factors and 3 levels.

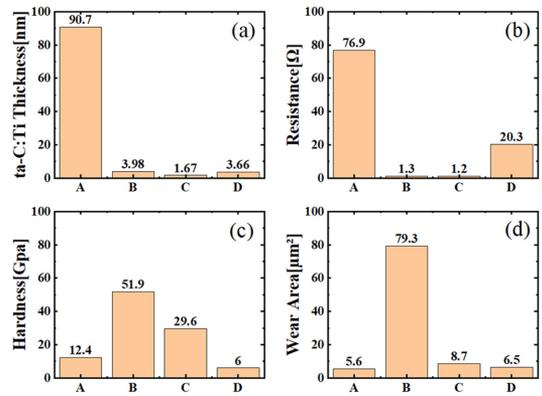


Fig. 5. Contributions of 4 factors to (a) ta-C:Ti thickness, (b) resistance, (C) hardness, (D) wear area.

소하는 경향을 갖고 3 수준에서 8.9 Ω 으로 최솟값을 갖는다. 이는 3-1-1에 나타난 바와 같이 UBM 방전 전류의 증가는 ta-C:Ti 코팅 막의 Ti 함유량 증가로 이어져 저항이 감소한 것으로 사료된다.

Fig. 4(b)에서 D 인자 또한 수준이 증가함에 따라 저항이 감소하는 경향을 가지며, 3 수준에서 최솟값 11.5 Ω 을 갖는다. 이에 따라 증착 과정 중 바이어스 전압이 증가함에 따라 조밀한 막의 형성이 저항 감소에 영향을 미친 것으로 사료된다. Fig. 4(b)에서 B, C 제어인자는 분산의 경향이 없고 기여율 낮아 제외하여, 최적조건과 최적 조건의 추정치는 A₃D₃(8 A, 100 V), 7.63 Ω 으로 도출하였다.

3-1-3. 경도

직교배열표의 경도 측정치를 망대 특성치로 분산 분석하여 Fig. 5(c)에서 B 인자가 51.9 % 의 가장 높은 기여율을 갖는다. Fig. 4(c)에서 B 인자는 수준이 증가함에 따라 경도가 증가하고, 3 수준에서 최댓값 11.6 Gpa이 도출되었다. 이는 2-2-2에 나타난 ta-C 코팅 막의 아크 방전 전류 증가 시 경도가 감소하는 것과 상반되는 결과이다. 아크 방전 전류의 증가가 ta-C:Ti 코팅 막의 ta-C 함유량 증가로 이어졌다. 함유량 증가는 Ti-C 결정을 생성하여 경도 상승에 영향을 미친 것으로 사료된다.

Fig. 4(c)에서 C 인자 수준이 증가함에 따라 경도가 감소하는 경향을 보이며, 3 수준에서 최솟값 10.1 Gpa를 가진다. 이는 2-2-2에 나타난 바와 같이 온도가 상승함에 따라 경도가 감소하였다. Fig. 4(c)에서 A, D 제어인자는 기여율이 낮아 제외하여, 최적조건과 최적 조건의 추정치는 B₃C₁(100 A, 80°C), 12.38 GPa로 도출하였다.

Table 4. Results of variance analysis

Characteristics	Thickness				Resistance				Hardness				Wear Area			
	Large the better				Smaller the better				Large the better				Smaller the better			
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
Contribution rate	90.7	3.98	1.67	3.66	76.9	1.3	1.2	20.3	12.4	51.9	29.6	6.0	5.6	79.3	8.7	6.5
Optimal Condition	A ₃ (8 A)				A ₃ D ₃ (8 A, 100 V)				B ₃ C ₁ (100 A, 80 °C)				B ₃ C ₂ (100 A, 100 °C)			
Optimal Value	796.30 nm				7.63 Ω				12.38 GPa				10.09 μm ²			

3-1-4. 마모

직교배열표의 마모 면적 측정치를 망소 특성치로 분산 분석하였을 때 Fig. 5(d)에서 A 인자가 가장 낮은 기여율, B 인자가 가장 높은 기여율을 갖는다. Fig. 4(d)에서 B 인자 3수준이 최솟값을 가지며, 수준이 증가함에 따라 감소하는 경향을 보였다. 이는 3-1-1에 나타난 바와 같이 A 인자 수준 증가에 따른 막의 Ti 함유량 증가가 B 인자 수준 증가에 따른 막의 ta-C 함유량 증가보다 많지만, 마모의 경우 소량의 ta-C의 함유량 증가가 더 큰 영향을 가진다. 경도와 동일하게 ta-C 함유량 증가는 Ti-C 결정을 생성하며, 이는 마모량 감소에 영향을 미친 것으로 사료된다.

Fig. 5(d)에서 기여율이 낮은 A, D 인자를 제외하여 마모 면적은 B₃C₂ (100 A, 100°C), 10.09 μm²으로 최적 조건과 최적 조건의 추정치를 도출하였다.

3-1-5. 최적 조건에서의 물성 검토

Table 4와 같이 다구찌 강건 설계를 통한 ta-C:Ti 증착 두께, 저항, 경도 그리고 마모의 최적 조건과 최적값을 추정하였다. Probe pin에 사용될 막에 요구되는 주된 물성은 저항과 수명 증가를 위한 마모량을 택하여 최적 조건에서 물성 평가를 실시하였다.

저항과 마모 면적에서 도출한 최적조건을 바탕으로 A₃B₃C₂D₃ (8 A, 100 A, 100°C, 100 V)으로 최적 조건을 선정하여 확인 실험을 진행하였다.

Table 5에 분산 분석을 토대로 최적조건의 추정값과 측정값을 도시하였다. 측정값은 추정값의 5% 이하의 오차율이 확인되었다. 저항의 경우 다구찌 실험계획을 통한 9 번의 실험 중 3 번째로 낮으며, 마모 면적의 경우 가장 낮은 마모량으로 확인되었다. 이를 통해 재현성 확보 및 다구찌 강건 설계의 효용성을 입증하였다.

Table 5. Estimation and result of optimal condition

	Thickness [nm]	Resistance [Ω]	Hardness [Gpa]	Wear Area [μm ²]
Estimation	761.93	8.22	10.93	8.58
Result	763.20	7.98	10.58	8.41

칼로 테스터를 통해 내마모성 평가를 진행하였다. 단 시간에 마모량을 측정할 수 있다는 장점이 있지만, 칼로 테스터로 평가한 내마모성의 경향이 타 장비로 평가한 내마모성의 경향과 일치하는지 추가적인 검토가 필요하다.

4. 결 론

본 연구에서 다구찌 강건설계를 통해 UBM 방전 전류, 아크 방전전류, 온도 및 바이어스 전압을 제어인자로 설정하여 ta-C:Ti 코팅 막에 대한 평가 특성치를 분산 분석하였다. 분석을 통해 평가 특성치에 따른 주된 조절 변수를 도출하고 전도성 및 내마모성 관점에서 최적 조건을 수립하여 확인 실험을 실시하였으며, 그 결과를 아래와 같이 요약하였다.

1) ta-C:Ti 두께와 저항은 UBM 방전 전류가 주된 변수이다. ta-C:Ti 두께는 UBM 방전 전류와 아크 방전전류가 상승함에 따라 증가하였다. UBM 방전 전류는 높은 이온에너지의 충돌로 인한 상승과 아크 방전 전류는 카본 플라즈마 Flux 증가에 의한 것으로 사료된다. 바이어스 전압 상승은 조밀한 막의 형성으로 두께가 감소한 것으로 사료된다. 저항은 UBM 방전 전류가 막의 Ti 함유량 증가로 이어져 저항이 감소한 것으로 사료된다.

2) 경도와 마모는 아크 방전 전류가 주된 변수이다. 아크 방전 전류의 상승으로 막의 ta-C는 Ti-C 결정을 생성하였으며, 경도와 내마모성이 향상된 것으로 사료된다.

3) 주된 조절 변수 도출을 통해 Probe pin의 수명 향상을 위한 최적 조건을 선정하였다. 전도성 및 내마모성 관점에서 최적조건 A₃B₃C₂D₃ (8 A, 100 A, 100°C, 100 V)을 선정하여 확인 실험을 통해 본 실험에서 진행한 측정값 중 가장 우수한 내마모성과 낮은 저항을 확인하였다. 그리고 예측값과 측정값은 5% 이하의 오차율을 통해 다구찌 강건 설계의 효용성을 입증하였다.

최적조건을 도출하였지만, 산업에서 적용을 위해 향상된 전도성 및 내마모성이 요구될 수 있다. 이에 따라 막의 물성에 적은 영향을 미치는 온도와 바이어스 전압을 제외하고, 주된 조절 변수이며 산포가 큰 UBM 방전 전

류, 아크 방전 전류의 조절 범위를 확장하여 실험을 계획한다면 향상된 전도성 및 내마모성을 도출할 수 있을 것으로 사료된다.

Acknowledgements

국가과학기술연구회에서 시행한 주요 사업(PNK8260)의 연구결과로 수행되었습니다.

References

- [1] Kim, Myeongin, Hong, Won Sik, Kim, Mi-Song, "Laser Soldering Process Optimization of MEMS Probe of Probe Card for Semiconductor Wafer Test", *J. Weld. and Join.*, Vol.40, No.3, pp.278-284, 2022.
- [2] Shim, Hee-Soo, Kim, Sun Kyoung, "Characterization of Probe Pin for LED Inspection System", *J. Korean Soc. manuf. Tech. Eng.*, Vol.24, No.6, pp.647-652, 2015, <https://doi.org/10.7735/ksmt.2015.24.6.647>
- [3] Jang, Changsoo, Park, Seungbae, Bill Infantolino, Lawrence Lehman, Ryan Morgan, Dipak Sengupta, "Failure analysis of contact probe pins for SnPb and Sn applications", *Microelectron. Reliab.*, <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2008.03.015>.
- [4] Robertson J, "Diamond- like amorphous carbon", *Mater. Sci. Eng.*, Vol.37, pp.129-181, 2002.
- [5] D. Bootkul, N. Saenphinit, B. Supsermpol, C. Aramwit, S. Intarasiri, "Synthesis of Ti-doped DLC film on SS304 steels by Filtered Cathodic Vacuum Arc (FCVA) technique for tribological improvement", *Appl. Surf. Science*, Vol.310, 2014, <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2014.04.053>.
- [6] Ji Cheng Ding, Yang Cheng, Shihong Zhang, Qimin Wang, Teng Fei Zhang, "Microstructure, mechanical and tribological properties of Ti doped ta-C films deposited by a hybrid coating system", *Diam. Relat. Mater.*, Vol.131, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2022.109565>.
- [7] Lin, Y., Lin, H., Liu, C., Huang, M., Chen, J., Shih, H.C., "Structure and characterization of the multi-layered Ti-DLC films by FCVA", *Diam. Relat. Mater.*, Vol.19, pp.1034-1039, 2010.
- [8] Ahn, Jun Yang, Kim, Dae Eun, Choi, Jin Yong, Shin, Keong Ho, "Friction Properties of Carbon Coated Ultra-thin Film using Taguchi Experimental Design", *J. Korean Soc. Precis. Eng.*, Vol.20, No.4, pp.143-150, 2003.
- [9] Jebb, A., Wynn, Henry, Rizvi, S., "Robust Engineering Design Post-Taguchi", *Philos. Trans. R. Soc. Math. Phys. Eng. Sciences*. Vol.327, 1989, <https://doi.org/10.1098/rsta.1989.0016>.
- [10] Yun, Won Young, Seo, Sun-Keun, "Determining the Level of A Noise Factor in Parameter Design for Smaller-the-better Characteristics", *J. Korean Inst. Eng.*, Vol.39, No.5, pp.367-373, 2013.
- [11] Park, Hyun Kag, Yang, Byoung Yull, Lee, Sang Bong, Kwon, Byung Il, "Novel Design of Flux Barrier in IPM type BLDC motor by considering the Multi-response Taguchi Method", *Trans. Korea. Electr. Eng.* Vol.56, No.3, pp.498-505, 2007.
- [12] Park, Gyung-Jin, Lee, Tae-Hee, Lee, Kwon Hee, Hwang, Kwang-Hyeon, "A Review of Robust Design Methodologies", *Trans. Korean Soc. Mech. Eng - A*, Vol.28, No.9, pp.1368-1383, 2004.
- [13] Cheon, Kang-Min, An, Jun-Hyeon, Hur, Jang-Wook, "Design of Gaskets for Hydrogen Fuel Cells Using Taguchi Method", *J. Korean Soc. Manuf. Process Eng.*, Vol.21, No.1, pp.66-72, 2022.
- [14] Ahn, Juengkyu, Chung, Jineun, Kang, Jeongho, Ha, Hyeongsoo, Park, Chansu, Pyo, Sukang, "A Study of Robust Design of Emission Characteristics for Off-road Diesel Engine using the Taguchi Method" *Trans. Korean Soc. Automot. Eng.*, pp.273-279, 2014.
- [15] Kim, Won-Seok, Kim, Songkil, Jang, Young-Jun, Kim, Jongkuk, "A Study on the Wear Behavior of Tetrahedral Amorphous Carbon Coatings Based on Bending Angles of the Filtered Cathodic Vacuum Arc with Different Arc Discharge Currents", *Tribol. Lubr.*, Vol.38, No.3, pp.101-108, 2022, <https://doi.org/10.9725/kts.2022.38.3.101>
- [16] Kang, Yong-Jin, Kim, Do Hyun, Ryu, Hojun, Kim, Jongkuk, Jang, Young-Jun, "Effects of Process Temperature on the Tribological Properties of Tetrahedral Amorphous Carbon (ta-C) Coating", *Tribol. Lubr.*, Vol.35, No.6, pp.362-368, 2019, <https://doi.org/10.9725/kts.2019.35.6.362>
- [17] Ji Cheng Ding, Haijuan Mei, Seonghee Jeong, Jun Zheng, Qi Min Wang, Kwang Ho Kim, "Effect of bias voltage on the microstructure and properties of Nb-DLC films prepared by a hybrid sputtering system", *J. Alloy. Compd.*, Vol.861, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.158505>.
- [18] Jang, Young-Jun, Kang, Yong-Jin, Kim, Gi Taek, Kim, Jongkuk, "Tribology Coating Study of Thick DLC (ta-C) Film", *J. Korean Soc. Tribol. Lubr.*, Vol.32, No.4, pp.125-131, 2016, <https://doi.org/10.9725/kstle.2016.32.4.125>
- [19] Kwak, Seung-Yun, Jang, Young-Jun, Ryu, Hojun, Kim, Jisoo, Kim, Jongkuk, "Optimization of tetrahedral amorphous carbon (ta-C) film deposited with filtered cathodic vacuum arc through Taguchi robust design", *J. Korean Inst. Suf. Eng.*, Vol.54, No.2, pp.53-61, 2021.
- [20] Rupetsov, Velko, Minchev, Raycho, "Experimental calo tester for the coaing thickness measurement", *Calo*, 2016.