

DLC, TiCN, 및 TiN film으로 코팅된 치과 교정용 와이어의 표면특성

문희종, 최한철*

조선대학교 치과대학 치과재료학교실

Surface Characteristics of Dental Orthodontic Wires Coated with DLC, TiCN, and TiN Film

*Hee-Jong Mun, Han-Cheol Choe**

*Department of Dental Materials, College of Dentistry, Chosun University,
Gwangju 61452, Korea*

This study aimed to evaluate the potential for improving surface characteristics by applying thin films of DLC, TiCN, and TiN to Ni-Ti, Ti-Mo, and SS wires. Surface characteristics were analyzed using FE-SEM and EDS. In addition, scratch testing was conducted to evaluate coating adhesion, tribological testing to assess frictional behavior, and electrochemical corrosion testing to determine corrosion resistance. The surface roughness of all wires coated with DLC, TiCN, and TiN was reduced, with the DLC-coated surfaces showing the most significant decrease. Scratch testing revealed that no delamination occurred beyond the second critical load (Lc2) in any coated specimen. All coatings exhibited critical loads exceeding 30 N, indicating good adhesion to the wire substrates. The coefficient of friction was lowest for DLC, at approximately 0.13, followed by TiCN at around 0.25. TiN initially showed a low coefficient but eventually increased to 0.9, indicating that DLC provided the most stable frictional behavior. In corrosion testing, the DLC-coated specimens exhibited the highest corrosion resistance. In contrast, TiCN-coated specimens showed the highest corrosion current density and the lowest polarization resistance, indicating the poorest corrosion resistance. Post-corrosion FE-SEM analysis showed that DLC-coated SS wires maintained a uniform coating layer without oxide formation or cracking. In contrast, TiCN-coated specimens exhibited clear local delamination and oxidation, indicating the most severe coating degradation. In conclusion, these findings suggest that DLC-coated wires may be particularly suitable for clinical use in lingual orthodontics due to aesthetic limitations of DLC coatings. Further studies under simulated oral conditions and long-term durability evaluations are needed to validate their clinical applicability.

Keywords : (Ni-Ti, Ti-Mo, SS) archwires, DLC, TiCN, TiN, Surface characteristics

Hee-Jong Mun (ORCID: 0009-0006-9043-9042)
Han-Cheol Choe (ORCID: 0000-0003-1966-781x)

*Correspondence: Han-Cheol Choe (ORCID: 0000-0003-1966-781x)
Affiliation: Department of Dental Materials, College of Dentistry, Chosun University,
Gwangju 61452, Republic of Korea
Tel: +82-62-230-6896, Fax: +82-62-230-6896
E-mail: hcchoe@chosun.ac.kr

Received: June. 08, 2025; Revised: June. 18, 2025; Accepted: June. 19, 2025

서론

치아 교정술은 심미성과 기능적 목적을 달성하기 위해 부정교합을 바로잡는 중요한 치료 과정 중 하나이다. 이러한 교정 치료에 있어 교정용 와이어는 치아에 부착된 브라켓을 통해 치아에 적절한 힘을 부여함으로써 치아 이동을 가능하게 하는 필수적인 구성 요소이다. 교정 치료의 성공적인 결과는 주로 치아 이동의 정밀성과 효율성에 달려 있으며, 이는 사용되는 교정 장치와 교정용 와이어의 성능에 크게 의존한다(1). 교정용 금속와이어는 단면 형태에 따라 원형(round)과 각형(rectangular)으로 구분되며, 사용 재질에 따라 다양한 종류로 분류된다. 또한, 임상 적용 부위에 따라 협측(buccal) 와이어와 심미성을 고려하지 않은 설측 교정 방식에서는 설측(lingual) 아치와이어로 분류된다(2-4). Ni-Ti 와이어는 초탄성 및 형상기억 효과를 지니며, 낮은 온도에서 마르텐사이트가 오스테나이트로 변하고 치료 외력에 의해 오스테나이트가 응력을 받으면 마르텐사이트로 변하는데, 이러한 변화를 반복하면서 교정력을 얻는 것으로 알려져 있다. 또한, 높은 스프링백(spring back)과 낮은 강성을 가지고 있어 초기 치아 이동 단계에서 주로 사용된다(5). 1979년 Burstone이 교정 영역에 베타-티타늄을 처음 소개하였는데, 이 베타-티타늄 와이어는 연하고 굴곡 부여가 어려운 니켈-티타늄 와이어와 단단하고 굴곡 부여가 용이한 스테인리스강 와이어 사이의 중간 단계의 와이어로서, 다양한 탄성계수가 다른 와이어의 사용과정에 따라 탄성계수 진행과정상에서 빠져있던 중간 단계의 탄성 계수를 제공한다. 베타-티타늄의 장점으로 우수한 spring back, 낮은 전성, 높은 성형성, 우수한 용접성이 보고된 바 있으며, 단점으로는 높은 마찰력이 보고된 바 있다(6, 7). 스테인리스강 와이어는 화학적으로 내식성이 우수하며, 기계적 특성인 탄성과 강도가 우수한 특성이 있다. 또한 우수한 가공성, 생체 적합성, 환경적 안정성 등의 특성으로 인해 마무리 단계에서 최종적인 치아 배열을 위해 사용된다(8).

이들 금속교정용 와이어의 표면 상태는 임상적 성능에 직접적인 영향을 미치며, 특히 표면 거칠기는 마찰력과 부식 저항성에 밀접한 관련이 있다. 일반적으로 표면이 거칠수록 브라켓과의 접촉 마찰력이 증가하고, 동시에 부식에도 더 취약해질 수 있다(9). 와이어의 표면 거칠기는 스테인리스

강(SS) 와이어가 가장 매끄럽고, 그 다음이 titanium-molybdenum(Ti-Mo), nickel-titanium(Ni-Ti) 순으로 거칠기가 증가하는 것으로 알려져 있다(10). 교정 치료 시 치아를 이동시키는 힘은 브라켓 슬롯과 와이어의 접촉면에서 마찰력을 유발하며, 이 마찰력은 치아 이동을 저해하는 주요 요인이 된다. 치아 이동이 원활하게 이루어지기 위해서는 교정력이 마찰력보다 커야 하므로, 브라켓과 와이어 간에 발생하는 마찰 특성에 대한 이해가 필수적이다. 브라켓과 선재 사이의 마찰력은 교정치료 시 치아 이동을 방해하며, 교정력을 50 % 이상 감소시킬 수 있다(11). 또한 기계적 요소인 브라켓의 재료, 표면 상태, 와이어의 재료, 교정선의 굵기와 단면 형태, 결찰 재의 종류 및 결찰력, 브라켓 slot의 크기와 폭경, 교정력의 방향 등과 환경적 요소인 타액, 치태, 부식 등의 영향을 받는다(12). 마찰력과 부식 때문에 나타나는 문제점을 해결하기 위해 sectional retraction 등의 시도가 있어 왔고 최근에는 sliding 효과를 위해 마찰을 일으키지 않도록 표면처리 등을 행하고 있다(13). Plasma 코팅기술은 교정 치료 중에 발생하는 마찰력을 감소시키기 위한 목적으로 사용되었다. 이러한 코팅들은 일정 수준의 마찰 감소 효과를 보이지만, 장기간 사용 시 피막의 박리나 변색, 내식성 저하 등의 문제가 발생할 수 있으며, 이로 인해 임상 적용에 있어 내구성과 기능성 측면에서 한계를 지닌다는 지적이 제기되어 왔다(14). 이에 따라, 보다 우수한 물리·화학적 안정성을 지닌 기능성 박막에 대한 필요성이 대두되고 있다.

최근 DLC(diamond-like carbon), TiCN(titanium carbonitride), 및 TiN(titanium nitride)과 같은 기능성 물질을 이용하여 의료용 기구에 코팅을 하고 있으며 탄소 기반의 물질로서 매우 높은 경도와 낮은 마찰계수를 지니며 균일한 평활도를 가지고 있다(15-18). 또한, TiN은 내식, 내마모, 및 낮은 마찰계수의 특성을 가지며 내마모성과 내변색성이 향상되었고 기계적 성질도 증가한다(19, 20). TiCN은 TiN 코팅 물질의 특성과 유사하며 높은 경도와 용점으로 마모 저항성이 우수하고, 화학적으로 안정하여 부식 및 침식에 강하고, 낮은 마찰계수로 인하여 응착 마모 저항성이 뛰어난 장점을 가지고 있다(21, 22). 지금까지 의료 분야를 포함한 다양한 금속 재료에 DLC 코팅을 적용하여 내식성 향상과 마찰을 감소하는 효과가 있음에도 교정용 와이어에 적용한 경우는

미미하다. 따라서 본 연구에서는 Ni-Ti, Ti-Mo, 및 SS 와이어에 DLC, TiCN, 및 TiN을 각각 코팅하여 이들 피막의 부식 저항성, 기계적 접착력, 마찰 특성, 및 부식 후 표면 변화 등을 종합적으로 평가하여 교정용 와이어의 성능향상을 위한 최적의 코팅조건을 조사하였다.

재료 및 방법

1. 표면처리 및 시편 제작

본 연구에 사용한 치과용 와이어는 모두 Figure 1에 있는 0.019×0.025 inch 크기의 각형 단면을 갖는 아치와이어를 사용하였다. Ni-Ti 와이어는 DynaFlex사(Dyna-Ti Nickel Titanium Archwire, USA) 에서 제조한 와이어를 사용하였고 Ti-Mo 와이어는 Ormco사(TMA™ Archwire, USA), SS 와이어는 DynaFlex사(Stainless Steel Archwire, USA) 를 사용하였다. 각 물질 코팅 전 실험에 앞서 초음파세척 및 70% 에탄올을 이용한 탈지 과정을 통해 표면의 유기물 및 이물질을 제거하였다.

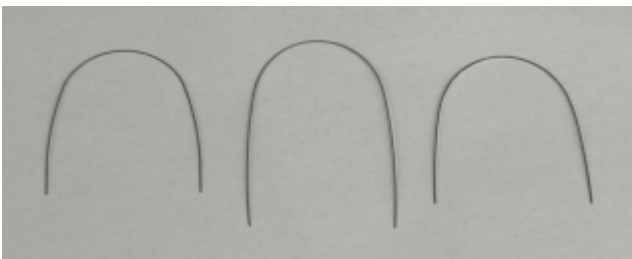


Figure 1. Non-coated orthodontic archwires used in this study; From left to right: Ni-Ti, Ti-Mo, and SS(rectangular type: 0.019 ×0.025 inch).

2. 코팅 공정

본 연구에서는 건식도금 장비인 하이브리드 플라즈마 증착 시스템을 이용하였으며 코팅 공정은 케미컬 클리닝, 샘플 로딩, 챔버 이베큐레이션, 100~420℃ 범위에서 프리히팅과 이온빔 처리, 이온 블러드먼트, 플라즈마 코팅 적용, 샘플 쿨링의 일곱 가지 주요 단계로 진행되었다. 챔버 내부는 초기 진공도 10⁶ Torr에 도달할 때까지 이베큐레이션 과정을

거친 후, 공정 진공도인 10³ Torr로 유지되었다. 이후, Ion bombardment(이온 충격) 과정이 진행되었으며, 이 과정을 통해 표면을 더욱 활성화시켜 코팅이 더욱 견고하게 부착될 수 있도록 하였다. 그 다음, 플라즈마 코팅이 적용되었으며, 이 과정에서는 DLC, TiCN, 및 TiN과 같은 다양한 박막이 각각의 최적 조건에 맞추어 증착하였다.

DLC 박막은 PECVD (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition) 공정을 통해 증착되었으며, 이 과정에서는 질소(N₂)와 아세틸렌(C₂H₂) 혼합 가스를 반응성 가스로 사용되었다. 반면, TiN 및 TiCN 박막은 아크 이온 플레이트(Arc Ion Plating, AIP) 방식으로 코팅되었다. TiN 코팅에는 반응성 가스로 질소(N₂)만 사용되었으며, TiCN 코팅에는 질소(N₂)와 아세틸렌(C₂H₂)을 혼합하여 사용하였다.

모든 증착 공정은 약 100분간 진행되었으며, 플라즈마 소스와 바이어스 전압은 사전 실험을 통해 최적화된 조건으로 설정되었다. DLC 증착 시 바이어스 전압은 80~120 V 범위였고, TiN 및 TiCN의 경우에는 -80~150 V로 설정되었다. 또한, 반응성 가스 유량은 DLC 코팅 시 질소 1000 sccm 및 아세틸렌 300 sccm, TiCN 코팅 시 질소 1000 sccm 및 아세틸렌 100 sccm, TiN 코팅 시 질소 1400 sccm의 혼합 가스를 사용하였다.

3. 와이어의 표면관찰 및 조성분석

코팅된 와이어의 표면은 코팅 전후의 조직 변화를 조사하기 위하여 광학현미경(Optical Microscopy, OM), 전계방출형 주사전자현미경(Field Emission Scanning Electron Microscopy, FE-SEM)으로 관찰하였으며 조성은 에너지 분산형 X-선 분광기(Energy Dispersive X-ray Spectroscopy, EDS)를 사용하여 분석하였다.

4. 코팅의 결합력 측정

코팅막의 결합력은 스크래치 테스터(JLST022, J&L tech, Korea)를 사용하여 평가하였다. 각 시편은 Ni-Ti 아치와이어에 DLC, TiCN, 및 TiN 코팅을 적용하여 준비하였으며, 결합력 측정 조건은 하중 0.5~30 N, scratch length 5 mm, scratch speed는 0.22 mm/s로 설정하였다. 결합력은 스크래치 트랙 상에서 코팅에 균열, 박막의 박리가 처음으로 발생한 지점

(Lc1, Lc2)을 기준으로 평가하였다. 각 실험은 3회 이상 반복 측정하여 데이터의 신뢰성을 확보하였다.

5. 코팅된 표면의 마찰계수 측정

마찰계수 시험은 핀-온-디스크 방식의 트라이보 시험기를 이용하여 수행되었다. 상대 마찰재로는 지름 6.00 mm의 루비(nuby) 볼을 사용하였으며, 마모 트랙의 반경은 5 mm로 설정하였다. 시험은 단일 주행(single-way) 모드로, 수직 하중은 1 N, 선속도는 3 cm/s의 조건에서 총 200 m의 마찰 거리를 기준으로 수행되었다. 정지 조건은 마찰 거리 200 m 도달 또는 마찰계수 2.00 이상일 경우 중지로 설정되었다. 시험 환경은 실험실 온도 28.7℃, 목표 온도 25.0℃, 상대 습도 61%의 조건에서 이루어졌으며, 데이터 수집 주기는 2.00 Hz로 설정하였다.

6. 전기화학적 부식시험

전기화학적 방법을 이용한 부식시험은 Parstat MC (Amtek, USA)을 사용하여 동전위법으로 실시하였다. 전해액 600 ml를 넣고 각각의 시편을 정전위 장치에 연결한 후 포화칼로멜전극(saturated calomel electrode, SCE)을 표준전극으로 하였으며 작업전극은 준비된 시편으로 하였다. 시편과 표준전극(reference electrode)간의 거리를 약 1 mm로 조절하였으며, 보조전극(counter electrode)으로 고밀도 탄소전극을 사용하였다. 양극분극곡선(anodic polarization curve)을 얻기 위해 36.5±1℃의 0.9% NaCl 전해액에서 동전위방법을 이용하여 1.67 mV/s의 주사속도로 -1000 mV에서 +1500 mV까지 전위를 가하여 1차 전기화학적 부식시험을 하였으며 실험 시마다 시편과 전해액을 교환하였다. X축은 전류밀도의 로그 값을 Y축은 전위로 하여 곡선을 얻었다. 전해액으로 임상환경에서 사용되는 인공타액을 사용하지 않은 이유는 일반적으로 생체소재의 평가에 사용되는 0.9% NaCl에서 측정한 데이터와 비교분석을 하기 위하여 이 용액을 사용하였으며 추후 타액에서 실험해야할 필요성이 있다.

부식 전류밀도(I_{cor})와 Tafel 기울기는 Tafel 분석을 통해 산출하였으며, 이를 바탕으로 분극 저항(R_p)은 다음의 Stern-Geary 식을 이용하여 계산하였다(24).

$$R_p = \frac{\beta_a \cdot \beta_c}{2.303 \cdot I_{corr} \cdot (\beta_a + \beta_c)}$$

여기서, R_p 는 분극 저항($\Omega \cdot \text{cm}^2$), I_{corr} 는 부식 전류밀도(A/cm^2), β_a 는 양극 Tafel 기울기(V/dec), β_c 는 음극 Tafel 기울기(V/dec)를 나타낸다.

7. 코팅된 와이어의 부식표면 관찰

0.9% NaCl 전해액에서 코팅된 시편의 전기화학적 거동을 조사하기 위하여 동전위법의 시험을 행한 와이어 표면의 금속조직변화를 조사하기 위하여 FE-SEM 및 EDS를 사용하여 관찰하였다.

결과

1. 코팅표면관찰

Figure 2는 조건별로 아치와이어를 코팅한 후, 코팅된 시편을 촬영한 사진으로, 코팅하지 않은 와이어(a)는 원래의 금속 색깔인 은색을, DLC를 코팅한 와이어(b)는 검정을, TiCN 코팅(c)는 회색, TiN 코팅(d)는 금색을 각각 나타내었다.

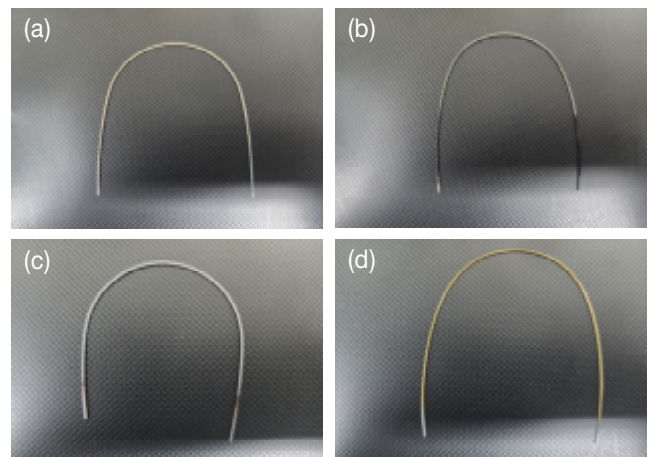


Figure 2. Photographic comparison of orthodontic archwires. (a) Non-coated, (b) DLC-coated, (c) TiCN-coated, and (d) TiN-coated.

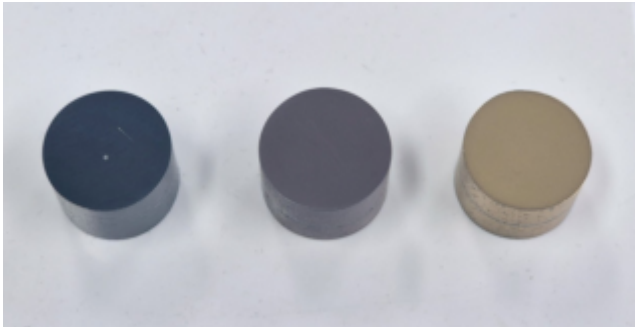


Figure 3. Surface appearance of coated specimens, DLC (black), TiCN(gray), and TiN(golden) from left to right.

코팅되지 않은 교정용 아치와이어의 표면 형상을 FE-SEM을 이용하여 $\times 500$ 배율에서 관찰한 사진이 Figure 4이다. (a)는 Ni-Ti 와이어, (b)는 Ti-Mo 와이어, (c)는 SS 와이어의 표면을 관찰한 것이다. 관찰 결과, (a) Ni-Ti는 표면 전체에 걸쳐 미세한 연마 자국과 함께 작은 크기의 점상 결함들이 다수 확인되었다. (b) Ti-Mo의 경우, Ni-Ti와 유사하게 연마 방향에 따른 선형 흔적이 관찰되었으나, 결함의 수와 크기는 상대적으로 적은 편이었다. 반면, (c) SS는 비교적 매끄러운 표면을 나타내었으며, 가시적인 흠집이나 결함이 거의 관찰되지 않아 가장 균일한 표면 특성을 보였다.

Ni-Ti 와이어 표면에 DLC, TiCN, 및 TiN를 코팅한 시편의 표면을 FE-SEM으로 관찰하고, EDS를 통해 원소 성분을 분석한 것이 Fig. 5이다. DLC로 코팅된 시편(a)는 표면이 비교적 균일하며, 미세한 흠과 일부 입자 형태가 관찰되었다. EDS 분석에서는 C, Ti, Ni가 검출되어 DLC 코팅의 형성과 함께 기지를 구성하는 성분이 동시에 검출되었음을 보인다. TiCN으로 코팅된 시편(b)는 표면에 다수의 미세한 입자와

불규칙한 패턴이 형성되어 있으며, 비교적 거친 형태를 보였다. EDS 결과에서 Ti, C, N, Ni가 확인되어 TiCN 피막이 성공적으로 형성되었음을 보여준다. TiN으로 코팅된 시편(c)는 표면이 균일하고 다소 매끄럽지만, 일부 입자들이 분포해 있는 양상이 보인다. EDS 분석에서는 Ti, N, Ni가 검출되어 TiN 조성의 코팅층이 형성되었음을 확인할 수 있다.

Figure 6은 Ti-Mo 와이어에 각각 코팅한 표면을 FE-SEM으로 관찰하고, EDS로 성분을 분석한 결과이다. DLC 시편(a)는 비교적 균일하고 매끄러운 표면을 보이며, 일부 미세한 입자들이 관찰된다. EDS 분석에서는 C와 Ti가 주로 검출되었으며, 지지 구성원소인 Mo가 검출되었으며 DLC 코팅이 잘 이루어졌음을 보여준다. TiCN 시편(b)는 표면에 불규칙한 크기의 입자가 다수 분포되어 거친 표면 형태를 나타낸다. EDS 결과에서는 C, N, Ti의 뚜렷한 피크가 확인되어 TiCN 특유의 성분 조성을 나타내며, 지지의 Mo도 일부 확인된다. TiN 시편(c)는 상대적으로 균일하고 매끄러운 표면을 나타낸다. EDS 분석에서는 Ti와 N이 주로 검출되었다

Figure 7은 SS 와이어에 동일한 조건으로 코팅 진행 후 표면을 관찰한 결과이다. DLC 시편(a)는 비교적 평탄하고 미세한 입자가 일부 분포한 형태를 보이며, EDS 분석에서는 C와 Cr, Fe, Ni이 검출되었다. TiCN 시편(b)은 표면에 다수의 구형 입자가 분포되어 매우 거친 표면 특성을 나타낸다. EDS 결과에서는 Ti, C, N, Cr이 검출되어 TiCN 피막이 형성되었음을 보여준다. TiN 시편(c)은 표면이 상대적으로 매끄럽고 균일한 특성을 보이며, 일부 결함 부위가 관찰된다. EDS 분석에서는 Ti와 N과 Cr이 검출되었다.

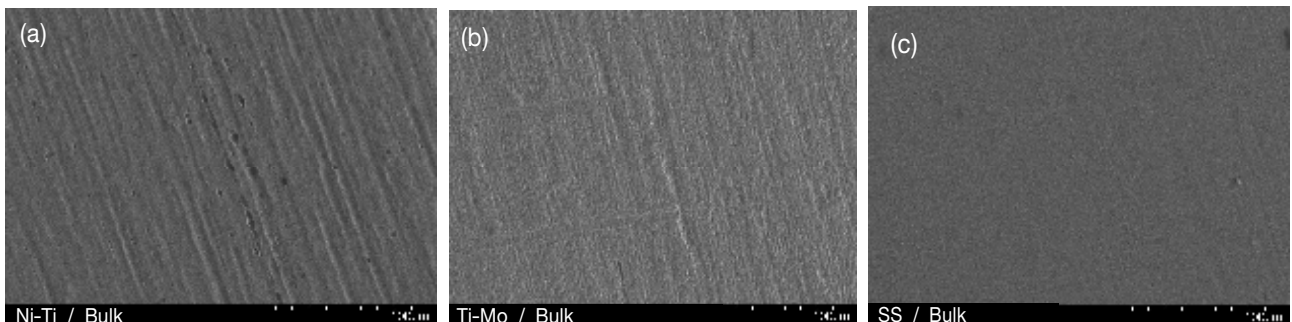


Figure 4. FE-SEM images of non-coated wires at $\times 500$ magnification; (a) Ni-Ti, (b) Ti-Mo, and (c) SS.

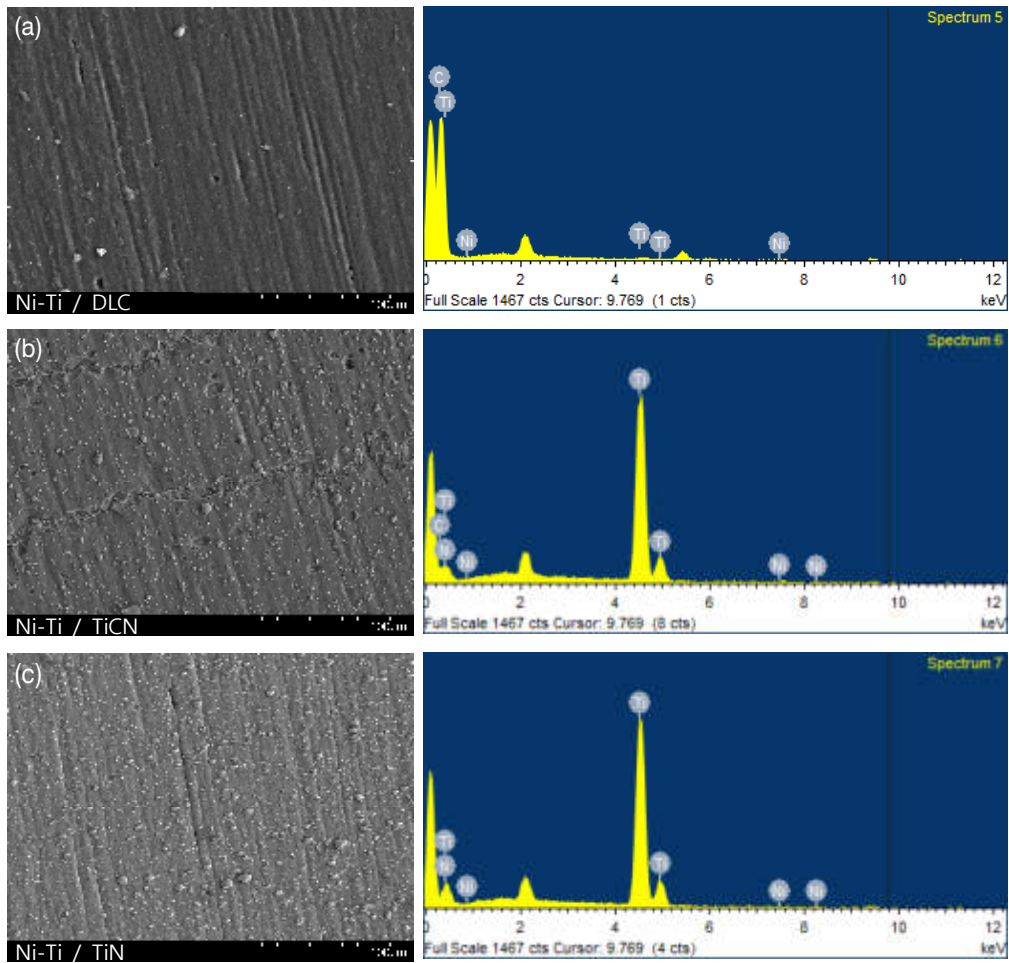


Figure 5. FE-SEM images and EDS elemental analysis of Ni-Ti wires coated with (a) DLC, (b) TiCN, and (c) TiN.

2. 코팅막의 접합력과 마찰특성

Scratch tester를 이용하여 각 코팅의 접착력을 평가하여 Figure 8에 나타내었다. 세 가지 코팅 모두에서 스크래치 트랙을 따라 마모 및 경미한 표면 손상이 관찰되었다. 특히, TiN 코팅의 경우 트랙 가장자리에 불규칙한 파손 및 균열이 동반된 넓은 마모 흔적이 나타났다. 그러나 모든 코팅에서 LC₁에 해당하는 초기 균열이나 미세 마모만이 관찰되었고, LC₂ 이상 수준의 박리(delamination)는 발생하지 않았다. 세 코팅 모두에서 임계 하중(Critical Load)은 30 N 이상으로 측정되었다.

Figure 9에서 DLC, TiCN, 및 TiN 코팅막의 마찰계수(Coefficient of Friction, CoF)를 비교한 결과, 각 코팅에 따라 뚜렷한 차이를 보였다. TiN 코팅은 초기에는 약 0.2

수준의 낮은 마찰계수를 보였으나, 실험이 진행됨에 따라 급격히 증가하여 최종적으로 0.9에 도달하였다. TiCN 코팅은 평균적으로 약 0.25 수준의 비교적 안정된 마찰계수를 유지하였으며, 일부 구간에서 진동이나 상승이 나타났다. 반면, DLC 코팅은 전 구간에 걸쳐 약 0.1로 가장 낮은 마찰계수를 나타냈고, 시간이 지남에 따라 오히려 감소하는 경향을 보였다.

3. 코팅막의 부식특성

Figure 10은 Ni-Ti 와이어의 부식 시험 후 양극분극 곡선을 보이며 코팅하지 않은 시편은 가장 낮은 전류밀도를 나타내어 우수한 내식성을 보여주었다. DLC 코팅 시편은 상대적으로 음의 부식전위를 나타냈지만, 부식전류밀도는 좌측에

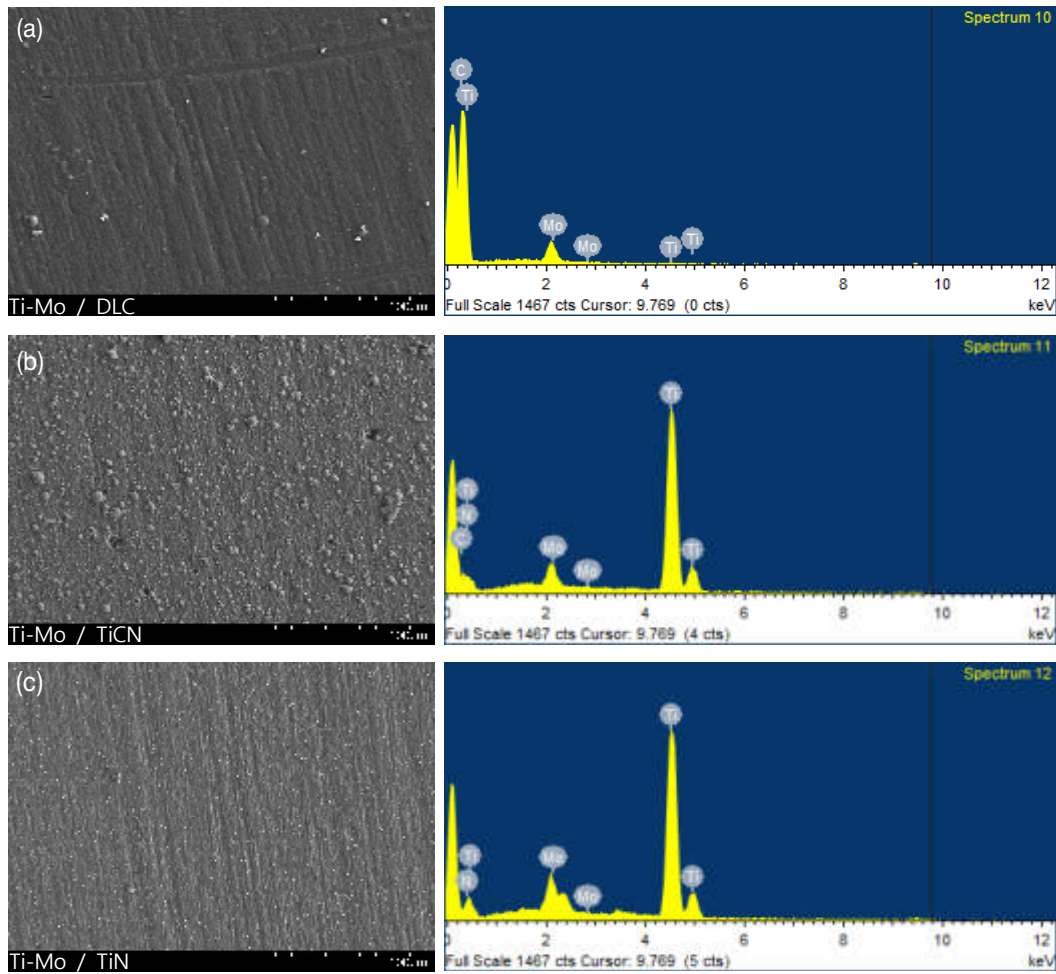


Figure 6. FE-SEM images and EDS elemental analysis of Ti-Mo wires coated with (a) DLC, (b) TiCN, and (c) TiN.

존재하여 낮은 수준으로, 실제 부식 속도는 낮게 나타났다. 또한, 양극분극곡선상에서 매우 안정적인 거동을 나타냈다. TiCN 코팅 시편은 부식전류밀도 값이 높게 나타나 불안정한 피막특성을 보였으며 코팅물질 중에서 가장 낮은 내식성 특성을 보였다. TiN 코팅 시편은 부식전위가 가장 높게 나타내어 양극반응에 대한 저항성이 큰 특성을 보였다. 그러나 전류밀도는 중간 수준이었고, 곡선의 형태가 다소 불규칙하게 나타났다.

Figure 11은 Ti-Mo시편의 경우도 DLC 코팅 시편이 우수하였으며 TiCN와 TiN 코팅은 전류밀도가 높게 나타나 내식성이 낮게 나타났다.

Figure 12는 SS 와이어의 부식 시험 결과를 나타낸 그래프로 DLC 코팅 시편이 가장 낮은 부식전위를 보여 내식성이

우수하였으며 TiCN 코팅의 곡선이 불안정하고 피막 안정성도 낮게 나타났다. TiN 코팅은 높은 부식전위를 나타내었으나, 전류밀도와 피막의 안정성 측면에서는 보통 정도로 평가되었다. Ni-Ti 와이어의 전기화학적 부식 시험 결과를 Table 1에 나타내었다. 그 결과, DLC 코팅 시편은 전반적으로 낮은 부식 전류밀도와 안정적인 부동태 영역 거동을 확인할 수 있었다. 분극 저항(R_p)은 $2.9 \times 10^{10} \Omega \cdot \text{cm}^2$ 로, 코팅하지 않은 시편에 이어 두 번째로 높았고, 코팅 조건 중에서는 가장 우수한 값을 나타냈다. 반면, TiCN 코팅은 I_{corr} 값이 $7.2 \times 10^{-8} \text{ A/cm}^2$ 로 가장 높게 나타났다. 또한 I_{pass} , I_c 항목에서 모두 높은 수치를 보여 피막 안정성이 낮고 부식 저항성이 가장 낮으며, TiN코팅은 E_{corr} 값이 -113.7 mV 로 내식성이 낮게 나타났다.

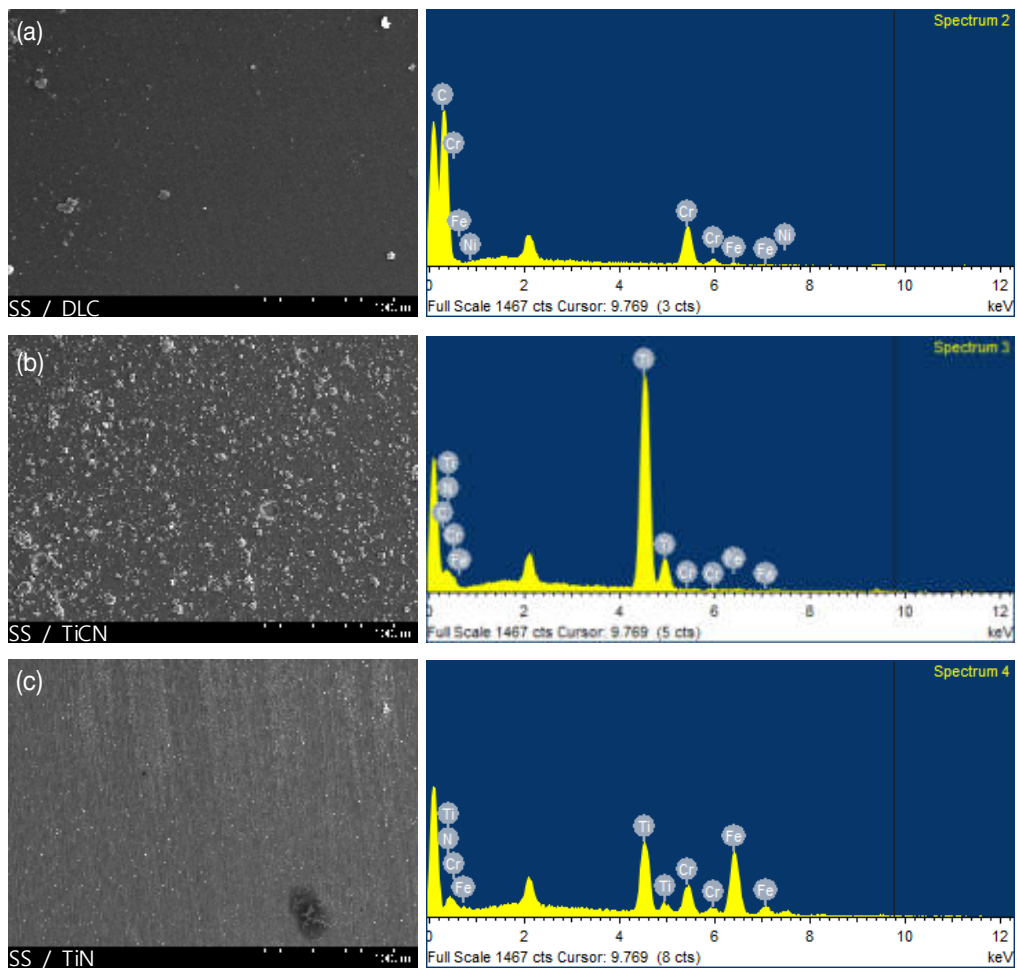


Figure 7. FE-SEM images and EDS elemental analysis of SS wires coated with (a) DLC, (b) TiCN, and (c) TiN.

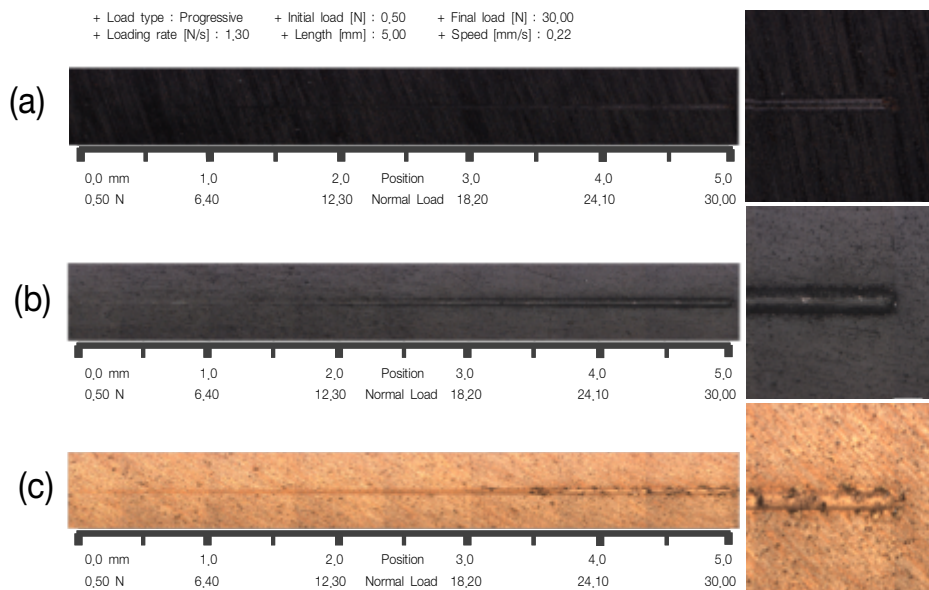


Figure 8. Scratch test results showing adhesion performance of (a) DLC, (b) TiCN, and (c) TiN coatings on wires.

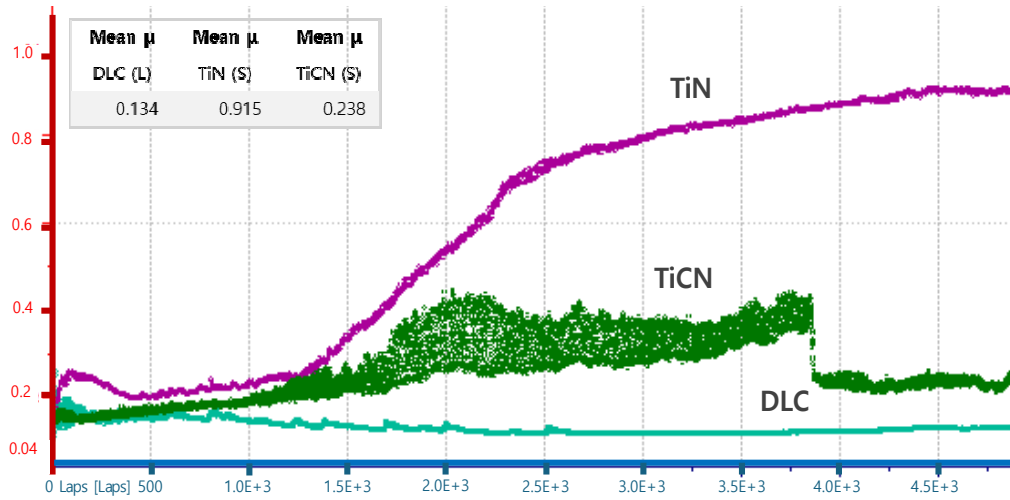


Figure 9. Coefficient of friction (CoF) curves for DLC, TiCN, and TiN coatings measured during sliding wear tests.

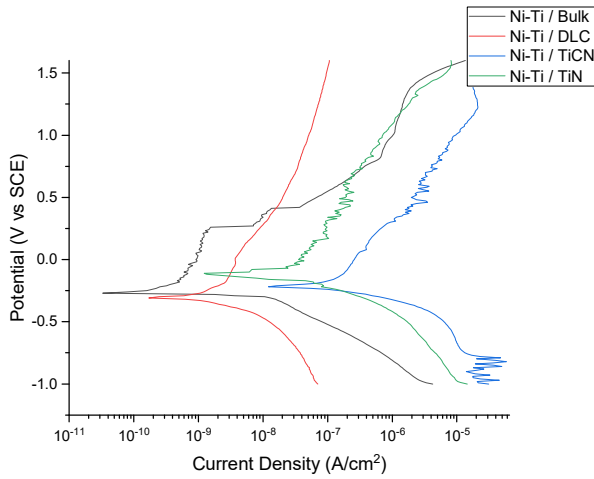


Figure 10. Corrosion test results of Ni-Ti archwires: non-coated, DLC-, TiCN-, and TiN-coated samples.

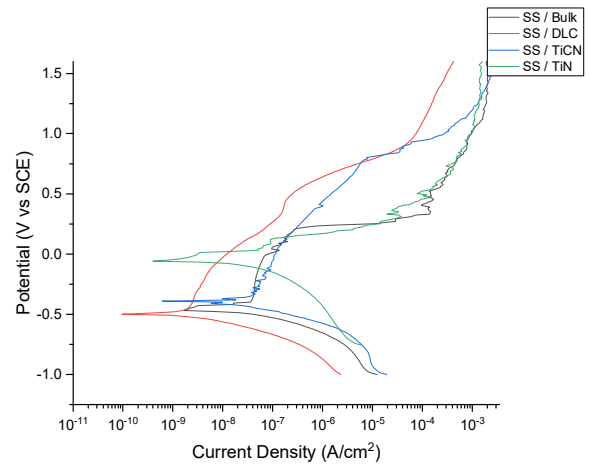


Figure 12. Corrosion test results of SS archwires: non-coated, DLC-, TiCN-, and TiN-coated samples.

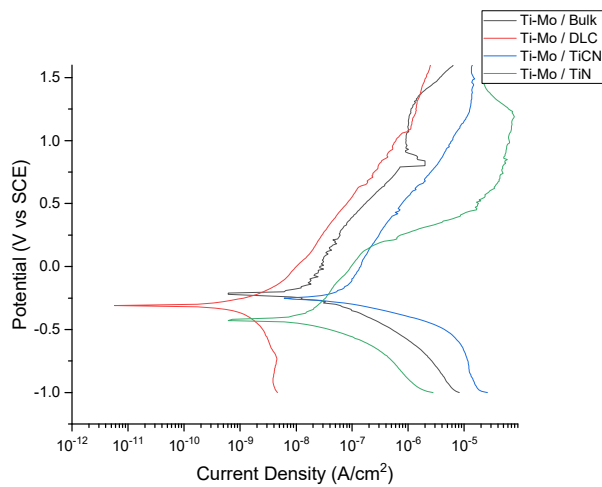


Figure 11. Corrosion test results of Ti-Mo archwires: non-coated, DLC-, TiCN-, and TiN-coated samples.

Ti-Mo 와이어의 전기화학적 부식 시험 결과를 Table 2에 나타내었다. DLC 코팅 시편이 전반적으로 가장 뛰어난 내식성을 나타냈다. E_{corr} 값은 DLC가 -308.9 mV로, 코팅하지 않은 시편의 E_{corr} 값인 -212.1 mV와 비교하여 현저히 낮은 값을 보여 부식에 대한 저항성이 높음을 확인할 수 있었다. 또한, I_{corr} 값은 DLC가 4.3×10^{-10} A/cm²로 가장 낮게 나타났다. 피막 안정성 측면에서도 DLC는 I_{pass} 값이 1.5×10^{-7} A/cm², I_c 값은 1.6×10^{-9} A/cm²로, 전체적으로 낮고 균일한 전류밀도 유지를 통해 코팅막의 내구성과 전기화학적 안정성을 확인하였다. R_p 값은 DLC가 7.3×10^{10} $\Omega \cdot \text{cm}^2$ 로 전체 조건 중 가장 높은 반면, TiCN과 TiN은 각각 I_{corr} 3.0×10^{-8}

Table 1. Electrochemical corrosion test results of Ni-Ti wires, non-coated and coated with DLC, TiCN, and TiN.

Sample	E_{corr} (mV)	i_{corr} (A/cm ²)	E_{pp} (mV)	i_{pass} (A/cm ²)	i_c (A/cm ²)	β_c (mV)	β_a (mV)	R_p ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)
Bulk	-266.1	2.1×10^{-10}	-109.7	1.4×10^{-9}	6.3×10^{-10}	31.8	283.6	5.9×10^{10}
DLC	-310.5	4.9×10^{-10}	-262.1	4.8×10^{-9}	1.1×10^{-9}	44.1	128.9	2.9×10^{10}
TiCN	-217.7	7.2×10^{-8}	-141.1	5.8×10^{-7}	1.5×10^{-7}	88.8	254.0	4.0×10^8
TiN	-113.7	1.5×10^{-8}	-28.2	2.3×10^{-7}	3.3×10^{-8}	135.2	227.3	2.4×10^9

Table 2. Electrochemical corrosion test results of Ti-Mo wires, non-coated and coated with DLC, TiCN, and TiN.

Sample	E_{corr} (mV)	i_{corr} (A/cm ²)	E_{pp} (mV)	i_{pass} (A/cm ²)	i_c (A/cm ²)	β_c (mV)	β_a (mV)	R_p ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)
Bulk	-212.1	9.0×10^{-9}	-137.1	5.9×10^{-8}	1.6×10^{-8}	151.7	282.1	4.8×10^9
DLC	-308.9	4.3×10^{-10}	-237.1	1.5×10^{-7}	1.6×10^{-9}	162	132.3	7.3×10^{10}
TiCN	-251.6	3.0×10^{-8}	-183.9	4.1×10^{-7}	6.4×10^{-8}	91.1	185.5	8.7×10^8
TiN	-424.2	8.7×10^{-9}	-354.8	1.5×10^{-7}	1.8×10^{-8}	108.3	201.8	3.5×10^9

Table 3. Electrochemical corrosion test results of SS wires, non-coated and coated with DLC, TiCN, and TiN.

Sample	E_{corr} (mV)	i_{corr} (A/cm ²)	E_{pp} (mV)	i_{pass} (A/cm ²)	i_c (A/cm ²)	β_c (mV)	β_a (mV)	R_p ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)
Bulk	-466.9	1.7×10^{-8}	-387.1	1.8×10^{-7}	3.8×10^{-8}	82.8	431.4	1.8×10^9
DLC	-498.4	1.2×10^{-9}	-454.0	1.0×10^{-8}	2.0×10^{-9}	66.7	192.9	1.8×10^{10}
TiCN	-389.5	2.4×10^{-8}	-339.5	1.9×10^{-7}	3.9×10^{-8}	115.7	477.1	1.7×10^9
TiN	-55.6	8.4×10^{-9}	41.9	3.2×10^{-4}	5.1×10^{-8}	79.0	112.3	2.4×10^9

A/cm², 8.7×10^9 A/cm²로 부식전류가 증가하였으며, 특히 TiCN은 i_{pass} 및 i_c 가 가장 높고 R_p 는 $8.9 \times 10^8 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 로 가장 낮아, 전반적인 피막 불안정성과 낮은 부식저항성을 보였다.

Table 3에 SS 와이어의 전기화학적 부식 시험 결과를 나타내었는데 DLC 코팅이 가장 우수한 내식성을 나타냈다. E_{corr} 값은 DLC가 -498.4 mV로, 다른 시편들과 비교 했을 때 가장 낮으며 부식 전류밀도는 1.2×10^9 A/cm²로 4종 시편 중 가장 낮은 값을 보였다. 피막 안정성 면에서도 DLC는 i_{pass} 값은 1.0×10^8 A/cm², i_c 값은 2.0×10^9 A/cm²로,

전체적으로 낮고 안정적인 전류밀도를 유지하는 특성을 보였다. 분극 저항은 $1.8 \times 10^{10} \Omega \cdot \text{cm}^2$ 로 DLC가 내식성에서 우수하게 나타났다.

반면, TiCN 및 TiN은 상대적으로 높은 i_{corr} 및 낮은 R_p 로, DLC 대비 부식 저항성이 크게 떨어지는 결과를 보였다.

4. 코팅막의 부식표면과찰

Figure 13은 Ni-Ti, Ti-Mo, 및 SS 와이어의 코팅하지 않은 표면을 부식한 후 FE-SEM을 이용해 촬영한 표면 이미지이다.

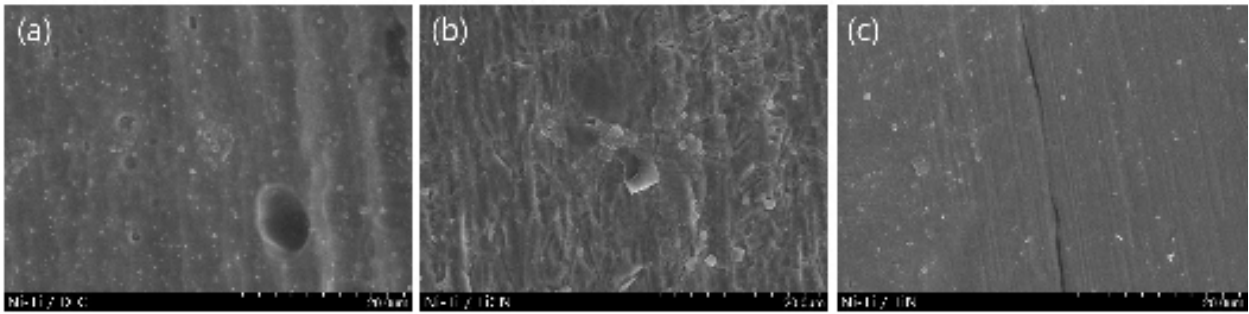


Figure 13. FE-SEM images of non-coated wires after corrosion testing, observed at $\times 2500$ magnification, (a) Ni-Ti, (b) Ti-Mo, and (c) SS.

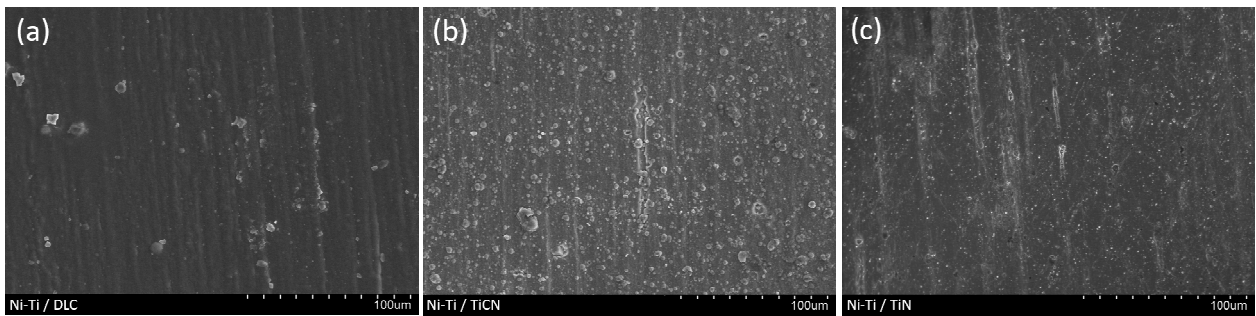


Figure 14. FE-SEM images of Ni-Ti wires after coating and corrosion testing, observed at $\times 500$ magnification, (a) DLC, (b) TiCN, and (c) TiN.

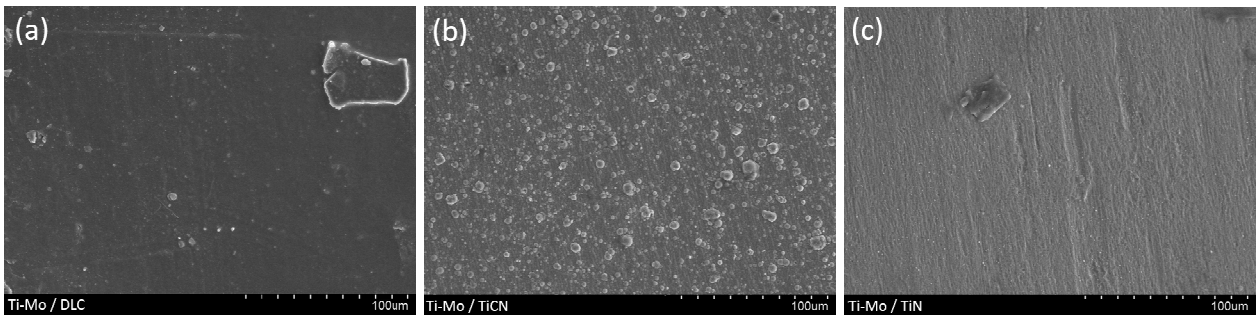


Figure 15. FE-SEM images of Ti-Mo wires after coating and corrosion testing, observed at $\times 500$ magnification, (a) DLC, (b) TiCN, and (c) TiN.

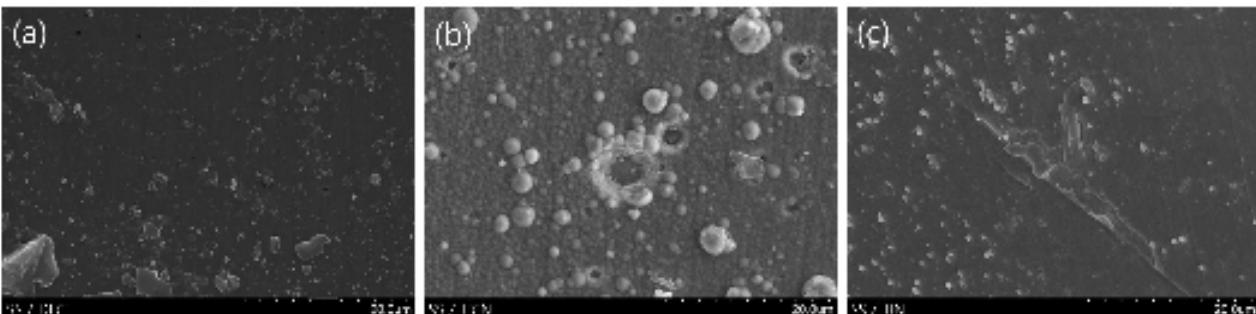


Figure 16. FE-SEM images of SS wires after coating and corrosion testing, observed at $\times 2500$ magnification, (a) DLC, (b) TiCN, and (c) TiN.

(a)는 Ni-Ti 시편으로 표면 전반에 기계 가공 흔적이 Fig. 4와 비교하여 뚜렷하게 나타났으며, 비교적 깊고 날카로운 홈이 공식(pitting) 형태로 관찰되었고, 부식 생성물로 추정되는 입자도 확인되었다. Ti-Mo 시편 (b)는 Ni-Ti에 비해 상대적으로 기계 가공 흔적이 덜 선명하게 나타났고 표면에서는 부식에 의한 침식이 일부 확인되었다. SS 시편 (c)는 세 금속 중에서 가장 매끄러운 표면을 나타냈다.

Figure 14는 Ni-Ti 와이어에 각 물질 코팅 후 부식 시험 결과를 FE-SEM으로 분석한 사진이다. (a) DLC로 코팅된 시편은 부식 시험 후에도 표면이 매끄럽고 코팅층의 연속성이 잘 유지되고 있다. (b)의 TiCN 코팅 시편은 표면 전반에 걸쳐 불규칙한 침식 흔적, 입자 분포, 표면 거칠기 증가가 뚜렷하게 나타났다. (c)의 TiN 코팅 시편은 표면 내 균열 형상의 흔적과 일부 박리 징후, 그리고 선형으로 진행된 부식 흔적이 관찰되었다.

Figure 15에서는 Ti-Mo 와이어 코팅 후 부식 시험 결과를 나타냈다. (a)의 DLC 코팅이 적용된 Ti-Mo 시편은 전체적으로 매끄럽고 균일한 표면 형상을 유지하고 있으며, 부식에 의한 침식 흔적은 거의 관찰되지 않는다. (b)의 TiCN 코팅 시편은 표면 전반에 걸쳐 다수의 밝은 입자나 점 부식 흔적이 분포되어 있으며, 전체적으로 표면이 조잡하고 피막이 불균일한 모습을 보인다. (c)의 TiN 코팅 시편은 전체적으로 연마 방향을 따른 선형 구조가 유지되고 있으며, 한 부위에서 작은 점 형태의 손상이나 국부 박락 흔적이 관찰된다.

Figure 16은 SS 와이어 코팅 후 부식 시험 결과이다. (a)의 DLC 코팅된 SS 시편은 전반적으로 균일하고 깨끗한 표면 구조를 보이며, 표면 손상이 거의 없는 양호한 상태다. (b)의 TiCN 코팅 시편은 다수의 공식부식 흔적과 입자 침전물이 두드러지며, 표면 전반에 걸쳐 코팅의 불균일성과 손상 흔적이 뚜렷하다. (c)의 TiN 코팅 시편은 선형의 코팅막의 파열 양상이 확인되었다.

고 찰

현재 임상에서 사용되는 Ni-Ti, Ti-Mo, SS 등의 교정용 와이어는 각각 고유의 스프링백(spring back)과 생체적합성을 지니고 있으나, 와이어와 브라켓 간의 마찰, 구강 내

환경에 따른 부식 등은 임상에서 빈번히 발생하는 문제로 지적되어 왔다(5). 이러한 요인은 치료 기간을 연장시키고 장치의 내구성을 저하시킬 수 있어, 마찰저항의 감소 및 재료의 구조적 안정성 확보는 교정 재료 설계에서 중요한 고려 요소로 평가된다(11).

이러한 문제를 해결하고자 최근에는 다양한 표면 코팅 기술이 접목되고 있으며, 특히 고경도·내식성·저마찰 특성을 동시에 갖춘 기능성 박막인 DLC, TiCN, 및 TiN 등이 산업 및 의료 분야에서 활발히 연구되고 있으나 이러한 코팅 기술은 주로 임플란트나 금속 기구에 적용되어 왔으며, 교정용 와이어에 대한 적용은 아직까지 제한적이며 체계적인 성능 비교 연구가 미미하다(21). 또한 기 연구는 교정용 와이어의 마찰력이나 부식 특성에 대해 단편적으로 접근하거나, 한 종류의 코팅 또는 기지 금속만을 중심으로 분석하는 경우가 많았다(25-27). 또한, 임상에서 시판되고 있는 일부 제품은 심미성을 강조하기 위하여 폴리머 또는 로뎀 코팅이 이루어졌으며 이들 코팅은 사용 중 박리되거나, 오히려 마찰저항을 증가시킴으로 인하여 교정 효과를 감소시키는 결과를 보였다(14).

따라서 교정력을 증가시키기 위하여 본 연구에서는 Ni-Ti, Ti-Mo 그리고 SS 와이어에 DLC, TiCN, 및 TiN 코팅하여 마찰저항을 감소시키고 코팅막의 접착력과 내식성을 확보하기 위한 연구를 하였다.

먼저 DLC, TiCN, 및 TiN 코팅을 하고 표면을 분석한 결과에서 DLC 코팅은 기계적·화학적 특성이 모두 우수하여 가장 좋은 표면 코팅막을 보였으나, 코팅 특유의 검은색 외관으로 인해 심미성 측면에서 일반적으로 사용되는 협측 교정에서는 사용에 제한적일 수 있어 심미성이 크게 요구되지 않는 설측(lingual) 교정용 와이어에 임상적으로 적용이 가능하다.

마찰 특성 실험 결과, DLC 코팅은 모든 기지 금속에서 가장 낮은 마찰계수를 나타냈으며, 이는 일반적으로 보고되는 DLC의 저마찰 특성과 일치한다(32, 33). 반면, TiCN 및 TiN 코팅은 초기에는 비교적 낮은 마찰저항을 나타내지만 진행되면서 피막 손상이나 파편화로 인한 접촉면 변화가 발생하여 마찰계수가 상승하는 경향을 보였다. 이러한 경향 역시 유사한 실험 조건에서 보고된 바 있으며, 표면 거칠기 및 피막의 기계적 특성이 마찰 안정성 유지에 중요한 영향을

미친다는 점에서 본 연구의 결과를 뒷받침한다(32, 33). TiCN과 TiN 코팅은 초기에는 낮은 마찰계수를 유지하였으나, 마찰이 진행됨에 따라 피막의 국부적인 마모 및 미세 손상이 축적되어 접촉면 특성이 변화하였고, 이로 인해 후반부에 마찰계수가 급격히 상승하는 거동을 보였다. 이는 피막 전체의 박리 현상보다는 응력 집중 및 마찰면 변화에 따른 마찰저항 증가로 해석된다(28).

교정 치료에서는 마찰 감소 효과 외에도 피막의 유지력, 접착력, 시각적 안정성까지 고려한 복합 설계 기준이 요구된다(37). 기능성 박막의 접착력은 교정용 와이어와 같은 반복 하중이 가해지는 장치에서 장기적인 피막 안정성을 좌우하는 핵심 요소이다. 본 실험에서는 세 종류의 DLC, TiCN, 및 TiN 코팅 모두 30N 이상의 임계 하중 Lc2에서 박리가 관찰되지 않았으며, 이는 전반적으로 기지 금속과 피막 간의 밀착도가 양호하다는 것을 나타낸다(29). 이 중에서도 DLC 코팅은 스크래치 트랙 전체에서 가장 균일한 피막 거동을 나타냈으며, 트랙 주변의 미세 손상이나 박리 경계가 거의 관찰되지 않았다. 이는 DLC가 증착 시 높은 밀착력과 균일한 층 형성을 이루며, 마찰 및 외력에 대한 저항성 외에도 기지와 계면 응력 완충 능력이 우수함을 의미한다.

구강 내 환경은 지속적인 수분, 이온, 온도 변화에 노출되므로, 교정용 와이어에 요구되는 내식성은 단순한 전기화학적 안정성뿐만 아니라, 부식 후에도 구조적으로 안정된 표면 상태를 유지하는 능력까지 포함된다(34). 전기화학적 측면에서 DLC는 모든 와이어와의 부식시험 결과에서 내식성 수치가 안정적이었고 부식 후 FE-SEM 관찰에서는 부식생성물 침착, 균열, 국부 박리 없이 가장 균일하고 매끄러운 표면 상태를 유지하였다. 이는 기존 연구에서도 보고된 DLC의 표면 안정성과 일치하는 경향이지만(35, 36), 본 연구에서는 Ni-Ti 와이어에서 표면이 거칠더라도 DLC 코팅한 경우 접착 강도가 증가하고 마찰계수가 감소하여 우수한 교정용 와이어의 표면 코팅으로 사용될 수 있음을 확인하였다. 반면 TiCN과 TiN 코팅은 모든 기지 조합에서 가장 취약한 내식성과 구조적 불안정성을 보였다. 기존의 교경도 기반 코팅 재료가 갖는 한계와 유사한 측면이 있다(34, 37).

향후에는 이러한 제조 변수와 장기 피로 시험 등을 포함한 심화된 성능 평가와 임상 환경을 모사한 실험 설계가 필요하

다. 이와 같은 총괄 비교와 고찰은 단순한 성능 수치 비교를 넘어, 기지-피막 간의 상호작용 구조, 실용 가능성, 임상 제약 조건 등을 포괄적으로 평가함으로써, 기능성 박막 기술의 적용 기준 정립 및 향후 소재 개발의 기초 자료로 기능할 수 있을 것으로 기대된다.

결론

본 연구에서는 Ni-Ti, Ti-Mo, SS의 세 가지 금속 기지에 기능성 박막(DLC, TiCN, TiN)을 각각 적용하여 마찰저항, 피막 결합력, 전기화학적 부식 특성 및 부식 후 구조 안정성을 종합적으로 평가 후 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. DLC, TiCN, 및 TiN을 코팅한 와이어는 모두 표면 거칠기가 감소되었으며, 특히 DLC 코팅에서 가장 크게 감소하였다.
2. 스크래치 시험 결과, 모든 코팅 시편에서 Lc₂ 이상의 박리는 발생하지 않았으며, 30N 이상의 임계 하중으로 와이어의 접착력이 양호하였다.
3. 마찰계수는 DLC가 약 0.13으로 가장 낮았고, TiCN은 약 0.25, TiN은 초기에는 낮았으나 최종적으로 0.9까지 증가하여 DLC가 가장 안정적인 마찰특성을 보였다.
4. 부식시험 결과, DLC 코팅 시편이 가장 우수한 내식성을 보였으며, TiCN은 가장 높은 부식 전류밀도와 낮은 분극 저항을 보여 내식성이 가장 낮았다.
5. 부식 후 FE-SEM 관찰 결과, DLC 코팅된 SS 와이어는 산화물 침착이나 균열 없이 균일한 피막을 유지하였으며, TiCN은 국부 박리와 산화 생성물이 뚜렷해 피막 손상이 가장 심하게 나타났다.

따라서 본 연구는 교정용 와이어에 기능성 박막인 DLC, TiCN, 및 TiN을 적용함으로써 표면 특성을 향상시킬 수 있음을 확인하였다. 특히, DLC 코팅은 거칠기 감소, 우수한 접착력, 저마찰 특성 및 탁월한 내식성을 바탕으로 가장 안정적인 성능을 설측 교정용 와이어 등 임상적 활용에 대한 가능성을 보여주었다.

참고문헌

1. Chainani, P., Paul, P., & Shivilani, V. : Recent Advances in Orthodontic Archwires: A Review, *Cureus*, 15(10): e47633, 2023.
2. Shah, S. : Orthodontic wires: Recent advances, *IP Indian Journal of Orthodontics and Dentofacial Research*, 7(4):286-290, 2021.
3. Shetty, V., Shetty, S. V., Sarje, S., Tandon, R., & Singh, K. : Lingual orthodontics - A review, *IP Indian Journal of Orthodontics and Dentofacial Research*, 6(2):44-50, 2020.
4. Kapila, S., and Sachdeva, R. :Mechanical properties and clinical applications of orthodontic wires, *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 96(2), 100-109, 1989.
5. Ferreira, M. A., Luersen, M. A., & Borges, P. C. : Nickel-titanium alloys: A systematic review, *Dental Press Journal of Orthodontics*, 17(3):71-82, 2012.
6. Goldberg, J., & Burstone, C. J. : An evaluation of beta titanium alloys for use in orthodontic appliances, *Journal of Dental Research*, 58(2):593-599, 1979.
7. Ravichandran, H. : Beta Titanium - Review, *Research Journal of Pharmacy and Technology*, 9(11):2020-2022, 2016.
8. Burstone, C. J., & Goldberg, A. J. : Mechanical properties and clinical applications of orthodontic wires, *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 96(3):249-257, 1989.
9. Amini, F., Rakhshan, V., Pousti, M., Rahimi, H., Shariati, M., & Aghamohamadi, B. : Variations in surface roughness of seven orthodontic archwires: an SEM-profilometry study, *Korean Journal of Orthodontics*, 42(3):129-137, 2012.
10. Mohan, R., & Jain, R. K. : An in vitro comparative evaluation of surface roughness characteristics of different orthodontic archwires: An atomic force microscopy study, *Journal of Dental Research, Dental Clinics, Dental Prospects*, 16(2):91-94, 2022.
11. Drescher, D., Bourauel, C., & Schumacher, H. A. : Frictional forces between bracket and arch wire, *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 96(5):397-404, 1989.
12. Husain, N., & Kumar, A. : Frictional Resistance between Orthodontic Brackets and Archwire: An in vitro Study, *Journal of Contemporary Dental Practice*, 12(2):91-99, 2011.
13. Berger, J. L. : The influence of the SPEED bracket's self-ligating design on force levels in tooth movement: a comparative in vitro study, *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 97(3):219-228, 1990.
14. Kim, Y., Cha, J.-Y., Hwang, C.-J., Yu, H. S., & Tahk, S. G. : Comparison of frictional forces between aesthetic orthodontic coated wires and self-ligation brackets, *Korean Journal of Orthodontics*, 44(4):157-167, 2014.
15. McKenzie, D. R. : Tetrahedral bonding in amorphous carbon, *Reports on Progress in Physics*, 59(12), 1611-1664, 1996.
16. Lifshitz, Y. : Diamond-like carbon — present status, *Diamond and Related Materials*, 8(8-9):1659-1676, 1999.
17. Robertson, J. : Diamond-like amorphous carbon, *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 37(4-6):129-281, 2002.
18. Koidl, P., Wild, Ch., Dischler, B., Wagner, J., and Ramsteiner, M. : Plasma Deposition, Properties and Structure of Amorphous Hydrogenated Carbon Films, *Materials Science Forum*, 52-53:41-70, 1990.
19. Peebles, D. E., and Pope, L. E. : Reactive evaporation of thin titanium nitride films in ultrahigh vacuum and their friction and wear behavior as a function of contact stress, *Thin Solid Films*, 175(1):17-25, 1989.
20. Habig, K. H. : Friction and wear of sliding couples coated with TiC, TiN or TiB₂, *Surface and Coatings Technology*, 42:133-147, 1990.
21. Knotek, O., Lugscheider, E., Loeffler, F., and Beele,

- W. : Diffusion barrier coatings with active bonding, designed for gas turbine blades, *Surface and Coatings Technology*, 68(1-3):22-26, 1994.
22. Deng, J., Braun, M., and Gudowska, I. : Properties of TiCN coatings prepared by magnetron sputtering, *Journal of Vacuum Science & Technology A*, 12(3):733-736, 1994.
 23. Drescher, D., Bourauel, C., and Schumacher, H. A. : Frictional forces between bracket and arch wire, *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 96(5):397-404, 1989.
 24. Mansfeld, F. : Electrochemical impedance spectroscopy (EIS) as a new tool for investigating methods of corrosion protection, *Electrochimica Acta*, 35(10):1533-1544, 1990.
 25. Ito, A., Kitaura, H., Noguchi, T., Ohori, F., and Mizoguchi, I. : Analysis of Coating Loss from Coated Stainless Steel Orthodontic Wire, *Applied Sciences*, 12(19):9497, 2022.
 26. Arici, N., Akdeniz, B. S., Oz, A. A., Gencer, Y., Tarakci, M., and Arici, S. : Effectiveness of medical coating materials in decreasing friction between orthodontic brackets and archwires, *Korean Journal of Orthodontics*, 51(4):270-281, 2021.
 27. Marques, I. S. V., Araújo, A. M., Gurgel, J. A., and Normando, D. : Debris, Roughness and Friction of Stainless Steel Archwires Following Clinical Use, *The Angle Orthodontist*, 80(3):521-527, 2010.
 28. Koko, A., Elmukashf, E., Fry, T., Gee, M., and Zhang, H. : Estimation of fatigue life of TiN coatings using cyclic micro-impact testing, *Thin Solid Films*, 798:140369, 2024.
 29. Lou, J., Luo, B., He, H., Zhang, J., Gao, Z., and Xu, W. : Evaluation of biocompatibility of 316L stainless steels coated with TiN, TiCN, and Ti-DLC films, *Coatings*, 12(8):1073, 2022.
 30. Brett, C. M. A., and Trandafir, F. : The corrosion of dental amalgam in artificial salivas: An electrochemical impedance study, *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 572(2):347-354, 2004.
 31. Wataha, J. C., and Messer, R. L. : Casting alloys, *Dental Clinics of North America*, 48(2), 499-512, 2004.
 32. Takadom, J., Bennani, H. H., & Allouard, M. : Friction and wear characteristics of TiN, TiCN and diamond-like carbon films, *Surface and Coatings Technology*, 88(1-3), 232-238, 1996.
 33. Shaikh, S., Sadeghi, M., Cruz, S., and Ferreira, F. : Recent progress on the tribology of pure/doped diamond-like carbon coatings and ionic liquids, *Coatings*, 14(1), Article 71, 2024.
 34. Zhang, R., Han, B., and Liu, X. : Functional surface coatings on orthodontic appliances: Reviews of friction reduction, antibacterial properties, and corrosion resistance, *International Journal of Molecular Sciences*, 24(8), Article 6919, 2023.
 35. Danisman, H., Celebi, F., Danisman, S., and Bicakci, A. A. : Effects of diamond-like carbon coating on frictional and mechanical properties of orthodontic brackets: An in vitro study, *APOS Trends in Orthodontics*, 12(1):13-19, 2022.
 36. Choe, H.C., Kim, S.C., Park, S.Y. : Fatigue fractured surface of dental file in EDTA solution with coating materials, *Corrosion Science and Technology*, 24(1), 34-44, 2025.
 37. Sugisawa, H., Kitaura, H., Ueda, K., Kimura, K., Ishida, M., Ochi, Y., Kishikawa, A., Ogawa, S., and Takano-Yamamoto, T. : Corrosion resistance and mechanical properties of titanium nitride plating on orthodontic wires, *Dental Materials Journal*, 37(2), 286-292, 2018.

DLC, TiCN, 및 TiN film으로 코팅된 치과 교정용 와이어의 표면특성

문희종, 최한철*

조선대학교 치과대학 치과재료학교실

이 연구는 Ni-Ti, Ti-Mo, SS 와이어에 DLC, TiCN, TiN 박막을 코팅하여 표면 특성을 평가하는 것을 목적으로 하였다. 표면 특성은 주사전자현미경(FE-SEM)과 에너지 분산형 분광기(EDS)를 이용하여 분석하였다. 또한, 코팅의 접착력을 평가하기 위해 긁힘(scratch) 시험, 마찰 거동을 평가하기 위한 마찰시험, 내식성을 확인하기 위한 전기화학적 부식시험을 실시하였다. DLC, TiCN, TiN으로 코팅된 모든 와이어의 표면 거칠기는 감소하였으며, 그 중에서도 DLC 코팅된 표면에서 가장 현저한 감소가 관찰되었다. 긁힘 시험 결과, 모든 코팅 시편에서 두 번째 임계 하중(Lc2) 이상에서도 박리가 발생하지 않았으며, 모든 코팅의 임계 하중은 30N을 초과하여 모재에 대한 우수한 접착력을 나타냈다. 마찰계수는 DLC 코팅에서 약 0.13으로 가장 낮았고, 그 다음은 TiCN(약 0.25) 순이었다. TiN은 초기에는 낮은 마찰계수를 보였으나 점차 0.9까지 증가하여, DLC가 가장 안정적인 마찰 특성을 제공함을 나타냈다. 부식 시험에서는 DLC 코팅 시편이 가장 높은 내식성을 보였으며, 반대로 TiCN 코팅 시편은 가장 높은 부식 전류 밀도와 가장 낮은 분극 저항을 보여 가장 낮은 내식성을 나타냈다. 부식 후 FE-SEM 분석 결과, DLC가 코팅된 SS 와이어는 산화물 형성이나 균열 없이 균일한 코팅층을 유지한 반면, TiCN 코팅 시편은 국소적인 박리와 부식현상이 뚜렷하게 나타나 가장 심한 코팅막의 퇴화를 보였다. 결론적으로, 이러한 결과는 심미적 요구와 내구성이 모두 요구되는 설측 교정에서 DLC 코팅 와이어가 임상적으로 특히 적합할 수 있음을 시사한다. 향후에는 모의 구강 환경에서의 시험과 장기 내구성 평가를 통해 임상 적용 가능성을 추가로 검증할 필요가 있다.

색인단어 : (Ni-Ti, Ti-Mo, SS) 교정용 와이어, DLC, TiCN, TiN, 표면 특성
