

아크방전(AIP)법에 의한 건식 표면처리기술의 현황과 전망

조용기 · 김성완

한국생산기술연구원 생산기반기술본부 플라즈마가공팀

1. 서 론

최근 산업계 전반에 걸쳐 기술환경의 급속한 변화로 산업 고도화가 이루어지고 있다. 이로 인해 종래의 기술에서 보다 질적인 고도화가 요구되고 있다. 이에 발맞추어 건식 표면처리 분야에도 여러 가지 가능성을 부여하는 기술을 개발하는 실정이다. 표면처리의 목적은 재료에 기능성을 부여하여 내식성, 내마모성, 내피로성, 내충격성, 내부식성, 내열성, 이형성, 광학특성, 전도성, 의장성 등 재료의 기능성 향상에 있다. 건식 표면처리기술은 진공기술과 플라즈마 기술의 발달로 현재 폭 넓게 응용 확산되고 있으며, 대부분의 금속 및 비금속 소재에 적용되고 있다. 이러한 건식 표면처리기술을 공구, 금형, 자동차 부품, 기계부품, 전기·전자부품 등의 분야에 적용하고 있으며, 앞으로 산업 고도화와 더불어 건식 표면처리기술의 응용 범위는 확산되고 있는 추세이다.

2. 건식 표면처리법과 응용분야

건식 표면처리법에는 PVD(Physical Vapor Deposition)법과 CVD(Chemical Vapor Deposition)법으로 크게 나뉘며, 본 고에서는 PVD법에 의한 건식 표면처리법에 대해서 기술하고자 한다. PVD법의 종류로는 진공증발법(Evaporation), 스퍼터링(Sputtering), 이온 플레이팅(Ion Plating), 이온주입(Implantation), E-beam 등의 기술이 있다. 이러한 건식 표면처리법은 재료 표면의 강화를 목적으로 하는 표면처리기술이며 재료의 표면에 내마모성, 내피로성, 내식성, 내열성 등의 기능성을 부여하여 성능 향상과 수명향상을 기대한다.

수십년 전부터 고경도, 내마모성, 의장성이 우수한 TiN 코팅이 시초가 되어 절삭공구와 금형 분야에 적용하여 실용화되었다. TiN 코팅의 효과가 우수하

게 입증된 이후 각종 기계부품, 롤, 금형, 장식품 등에 적용하여 그 범위를 넓혀가고 있다. TiN 코팅 이외에 IV, V, VI족의 질화물, 탄화물을 중심으로 더욱 기능성이 부여된 TiC, TiCN, TiAlN, ZrN, CrN, DLC 등의 각종의 초경질 피막이 합성되어 적용되고 있다. 응용분야로는 절삭공구, 자동차 부품, 장식, 금형제품, 기계부품 분야이며 표 1은 산업적으로 많이 활용되고 있는 코팅의 종류와 특성이다.

이러한 코팅 종류와 특성을 살펴보면, 우선 TiN 코팅은 가장 일반적이고 대중화된 코팅으로서 뛰어난 내마모성과 내식성에 의해 금형, 각종절삭공구, 자동차 부품, 장식품 등에 광범위하게 이용되고 있는 코팅이며, 저온처리로 재료의 변형이 없으며 재코팅이 용이하여 공구의 수명연장에 우수한 효과를 나타낸다. 응용분야로는 각종 공구(HSS, 초경)인 Drill, E/M, Cutter, Insert, Chip, Hob, Broach, 각종 Punch와 각종 금형(냉간, 열간)인 일반 금형, 단조 금형, 사출 성금형, 프레스 금형 등에 적용되며, 자동차부품(합금강, 탄소강)으로 베어링, 샤프트, 밸브, 노즐 등과 그 외 장식품으로 안경테, 식기, 면도날, 가위 등에 적용된다.

TiCN 코팅은 TiN보다 높은 경도와 낮은 마찰계수를 나타내어 높은 내마모성으로 공구의 수명을 한층 향상시킨다. 특히, 냉간 단조 Punching과 Forming 작업에 사용되는 각종 공구에 효과가 좋다. 응용분야로는 각종 공구(HSS초경)인 Drill, E/M, Cutter, 각종 Punch 등과 Drawing Die에 적용된다.

기존의 절삭공구의 코팅으로서는 TiN, TiCN 코팅이 주류였으나 최근 고속가공이 실현되면서 고속가공공구의 수요가 증대되고 있다. 고속가공은 고속 절삭시에 900°C 이상의 고온이 발생하여 고온에 의한 절삭공구의 내마모성과 내산화성 및 내열성 그리고 고경도의 코팅 막이 필요하다. TiN의 경우 620°C 이상부터 산화가 진행되어 고속공구 코팅으로는 적합하지 않다. 이중 Al이 첨가된 질화막인 TiAlN의 경

표 1. 하드코팅 종류와 응용분야

막종	색상	경도(Hv)	마찰계수	내식성	내산화성	내마모성	용도
TiN	금색	2000~2400	0.45	○	○	○	절삭공구, 금형, 장식품
ZrN	밝은 금색	2000~2200	0.45	○	△	△	장식품
CrN	은백색	2000~2200	0.25	◎	○	○	기계부품, 금형
TiAlN	보라~회색	2500~2900	0.45	○	◎	○	절삭공구, 금형, 장식품
TiC	은백색	3000~3500	0.01	△	△	◎	절삭공구
Al ₂ O ₃	투명~회색	2200~2400	0.15	○	◎	○	절연막, 기능막
DLC	회색~흑색	1800~8000	0.10	○	○	○	절삭공구, 기능막, 금형

우 840°C까지 산화하지 않고 안정하다. 따라서 다른 코팅에 비해 고속절삭공구 코팅에 유용하다. 공구의 형태와 종류에 따라 그 쓰임새가 다르지만 주된 용도로는 일반 강재의 고속 절삭, 금형의 모방 절삭, 스테인레스 강등의 난삭재, 금형의 R부 가공, 깊은 리브홈 가공, 리브홈 절삭 등 주로 고경도 고속절삭에 효과가 크다. 특성으로 고경도, 내마모성, 내산화성, 내열성 향상과 고온고속의 절삭성이 우수하여 수명을 향상을 나타내고 있다. 응용분야로는 고온, 고속 작업에서 사용되는 각종절삭공구(HSS, 초경)과 Drill, E/M, Tap 등이 있다.

CrN 코팅은 Roll 코팅을 기존의 습식 도금에서 대체하여 각광받고 있으며 종래의 경질 크롬 표면처리와 TiN 등과 같은 경질 재료와 중간적 성질을 가지고 있으며, 특히 기계부품의 습동면과 Matching성의 양호한 표면처리로서 주목받고 있다. 그 응용분야로는 분말성형 Punch, 각종 금형, 자동차부품 등에 적용된다. DLC는 탄소계 박막 코팅으로 광학특성, 윤활성, 내마모, 내식, 이형성, 절연성, 고경도(Hv3000-5000)의 우수한 특성을 나타내고 있어 광학소재 및 기계부품의 코팅재료로서 이용되고 있다. 그러나 내열성(400-500°C 이하)이 떨어지고 증착 속도가 낮고 내부의 잔류응력 때문에 두꺼운 피막을 형성하지 못하는 단점이 있다. 응용분야로는 IR 차폐막, 광학제품, 공구, 기계부품, 전자부품, 금형, 장식용 등에 이용되고 있다.

3. 이온 플레이팅에 의한 표면처리 기술

3.1. 이온 플레이팅 기술

위에서 기술한 건식 표면처리법 중에서 이온 플레이팅법은 기능성 표면처리법 중에서 가장 보편화된 기술로서 절삭공구, 기계부품, 금형, 장식품 등에 적용되고 있다. 이온 플레이팅법은 다른 표면처리 방법에 비해 장비 운용성, 코팅의 적용성, 제품 생산성, 경제성 등을 고려하면 효과적이라고 할 수 있다. 이온 플레이팅법은 진공분위기에서 주로 금속재료 위에 코팅하는 방법으로 재료의 종류에 따라서 유리, 세라믹, 플라스틱에도 적용이 가능하다.

이온 플레이팅법에는 열음극을 설치하고 열전자를 증발물질에 충돌시켜 이온화하는 방법과 고주파를 이용하여 이온화를 촉진하는 방법, 증발물을 음극으로 하여 음극의 아크방전을 유도하여 증발물질을 국부적으로 녹여 증발시키고 플라즈마 내에서 이온화하여 증착하는 아크방전법, Hollow Cathode Discharge를 이용한 방법(HCD법), 클러스터법(Cluster법), 활성화 반응증착법(ARE법)이 있다.

이온 플레이팅법은 질화물, 탄화물, 세라믹, 복합소재 등의 다양한 코팅의 적용과 높은 증착율, 스퍼터링 등과 비교하여 기판과 피막간의 우수한 밀착력, 그리고 저온 공정으로 재료의 열적 변형을 시키지 않는 장점이 있다. 그러나 피처리물의 형상, 공정변수, 드립렛 문제, 미세공 및 편홀의 코팅 불가 등의 단점이 있다.

3.2. 아크방전법에 의한 하드코팅 기술

이온 플레이팅법 중에서 아크방전법은 증발물질인 금속을 음극 타겟으로 하여 저전압(30~70 V), 고전류(50A~300A)의 전계를 이용하여 타겟 물질의 표면에 마이크로미터 정도 내에 아크를 발생시키고 이

아크에 의해 타겟 물질을 국부적으로 녹여 타겟 물질을 증발시키게 된다. 이러한 미세 아크는 음극영역 및 아크의 전자기장에 의한 작용으로 타겟 표면 전 지역에 걸쳐 아크가 발생되고 타겟의 전영역에서 아크에 의한 침식(타겟물질의 증발)이 발생하게 된다. 증발원으로부터 액체상태로 증발한 타겟 물질은 증발 원으로부터 방출되면서 갖게된 운동량에 의해 플라즈마 내로 유입되고 플라즈마와 접한 피처리물에 도달 된다.

질화물 합성 시에는 반응성 기체를 인입하고, 타겟 물질과 반응성 기체는 타겟과 피처리물 사이의 플라즈마 내에서 이온화되어 피처리물의 표면에 증착이 된다. 기층에 바이어를 인가 시에 보다 높은 증착 속도와 기층과의 우수한 밀착력을 갖게된다. 타겟물질이 혼합물질일 경우 타겟 물질의 혼합조성에 거의 일정하게 증발되며 혼합 물질의 증발율에 따라서 조성이 변하기도 한다. 타겟 물질은 고체이며, 진공용기의 크기 코팅층의 균일성, 대면적의 피처리물 등의 조건에 따라 한 두 개 이상의 위치(상부, 수평, 수직)에 타겟 물질을 설치하게 된다. 또한 시편을 공자전 시킴으로서 코팅의 균일성을 유지한다.

코팅 과정은 시편장착 진공배기, 온도가열, 콘디션닝, 코팅, 냉각, 순으로 이루어지게 된다. 타겟 물질의 열부하를 냉각으로 해소해야 하며, 피 처리물로 향하는 방출열을 10% 이하로 유지한다. 이는 증발된 타겟 물질에 의해 시편의 온도 상승을 막는 것으로 일부 시편들에 한하여 온도에 민감하게 작용하기 때문이며, 약 200°C 이하의 온도를 유지한다. 고전력에 의해 증발된 금속들은 고밀도 플라즈마 내에서 이온화되어 거의 양전하를 띄게 되며, 반응성 기체와 반응하게 된다. 따라서 아크방전법에 의해 금속과 기체의 화학양론적 합성이 가능하며 반응기체의 양에 따라서 조성을 변화할 수 있으며 쉽게 경사층이나 다층막에 적용할 수 있다.

아크방전법은 타겟 물질 및 반응기체에 의해 단일 및 다층금속이나 화합물을 금속시편에 증착할 수 있으며, 시편에 음극 전압을 가하여 하드코팅에서 가장 중요한 시편과 코팅층간의 우수한 밀착력을 형성할 수 있다. 비교적 간단한 공정과 공정의 안정성 쉬운 유보수, 고품질의 제품을 빠르게 생산하는 장점을 갖고 있다. 표 2은 아크방전법의 장점을 나타내었다.

표 2. 아크방전법의 장점

적용물질	<ul style="list-style-type: none"> • 코팅 물질 적용의 다양성 <ul style="list-style-type: none"> - Ti, Mo (Metal) - MeCrAlY (M₁, M₂, ... Mn) - TiN, CrN (M₁, Gas) - TiCN (M₁, G₁, ... Gn) - TiAlN (M₁, ... Mn, G₁) - TiN + (Ti,Zr)N + ZrN (Multilayers) - Ti_xAl_yN_z (Gradient Layers) - DLC, TiBN (Others)
공정조건	<ul style="list-style-type: none"> • 낮은 공정온도(180°C 이하) • 높은 증착율 • 높은 이온화율 - 높은 밀착력 - 조밀구조 - 우수한 박막 특성
전처리과정	<ul style="list-style-type: none"> • 다양한 가열 및 세척공정 - 시편손상이 없음 - 짧은 가열시간 - 적은 수의 드립렛(droplets)
장비운영	<ul style="list-style-type: none"> • 간단한 코팅공정 • 높은 생산성 및 저비용으로 장비운영

그림 1은 아크방전 장치를 나타낸 그림이며 또한 타겟 물질 위에 아크방전이 발생하고 있는 모습이다. 그림과 같은 장치를 통하여 다양한 기능성 코팅을 하는데 이들 종류에 따른 코팅의 특성은 경도의 경우 Carbon(DLC) 코팅이 가장 높으며 Ti(C, N), TiC 순으로 나타난다. 기능성 코팅에 있어 코팅의 밀착력은 매우 중요한 특성이라 할 수 있다. 이러한 밀착력은 TiN이 가장 우수하여 약 70 N 이하를 나타낸다. 내마모성의 특성은 윤활 특성인 마찰계수로 측정할 수 있으며 Carbon(DLC) 코팅에서 0.1 정도를 나타내어 우수한 윤활 특성을 나타내고 있음을 알 수 있다.

3.3. 코팅 공정 및 특성 평가

이온 플레이팅법에 의한 TiN과 같은 화합물 코팅 공정은 $1 \times 10^{-2} \sim 1 \times 10^{-3}$ Torr 정도의 Ar 가스 분위기의 진공압력에서 아크전을 타겟을 설치하고 저전압 고전류의 전원을 인가하여 아크방전을 유도하고, 타겟 물질 증발시켜 플라즈마 내에서 이온화시키고 반응성 기체를 인입하여 화학양론적인 화합물을 합성하는 공정이다. 이러한 공정에서 피막의 기능성 부여 및 수명 향상에 상관성을 갖는 막두께, 밀착성, 표면결합, 경도 등의 특성은 피막의 품질을 좌우하는데

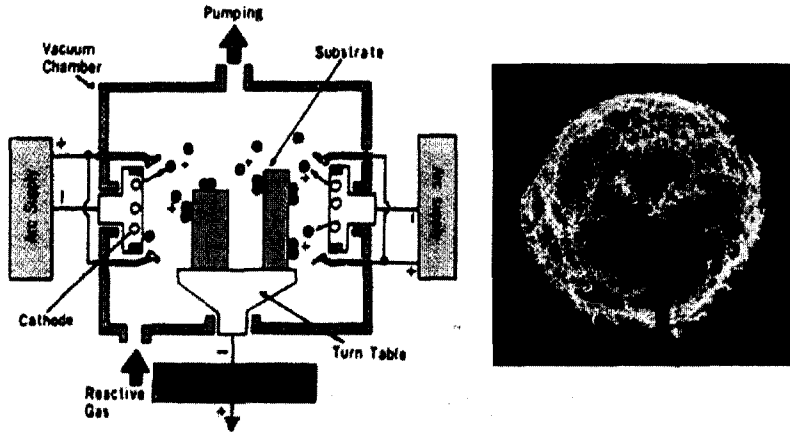


그림 1. 아크방전 코팅장치 및 아크의 모습.

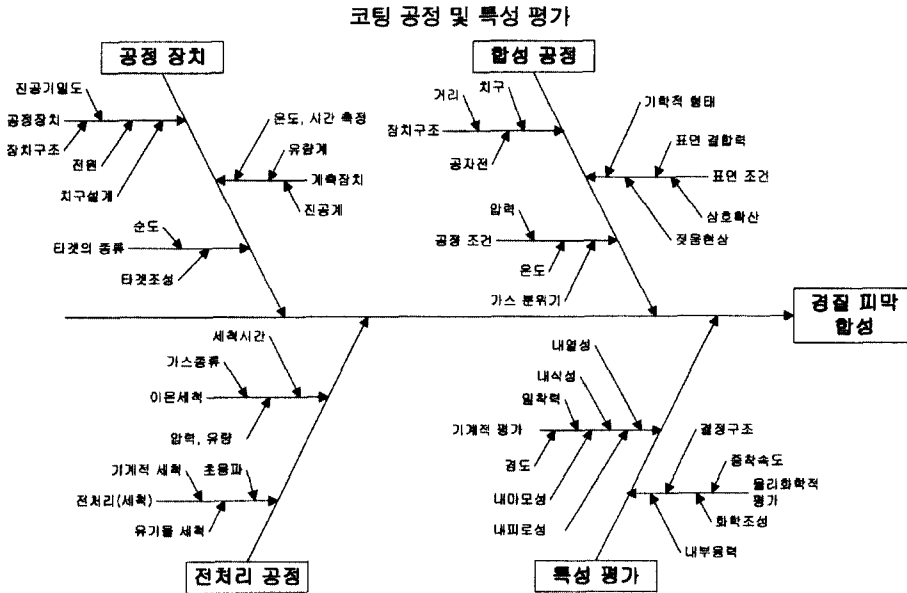


그림 2. 코팅 공정에 대한 특성 요인도.

중요한 요인이라고 할 수 있다.

공정조건에 대한 특성을 살펴보면, 막두께는 증발원과 피처리물 간의 거리와 증발방향의 각도에 따라서 증착되는 물질의 양이 좌우된다. 증발원과 피처리물의 거리의 2승에 반비례하고, 증발방향에 따라 COS에 비례한다. 증발원의 증발량은 항상 균일 증발속도를 갖으려면 증발물질의 표면온도를 제어 중요하며, 막두께와 거리의 관계는 반비례이므로 증발원의 거리 및 각도의 영향을 작게하는 피처리물의 등거리화와 피처리물의 회전을 이용하여

막의 균일화를 꾀할 수 있다. 또한 Ar가스와 혼합가스의 가스압에 따라서 플라즈마의 안정과 피막의 막질에 영향을 주어 적절한 가스압을 유지하는 것은 중요하다. 이러한 막두께는 1μm 정도가 피막의 수명에 유효하지만 최적두께는 사용되는 조건에 좌우된다.

내마모성, 내피로성 등이 우수한 피막은 우선 기층과의 밀착력과 관계가 있다. 이러한 밀착력은 원자 및 분자간의 관계와 함께 기하학적인 형태, 표면의 결합력, 젖음현상, 상호확산 등에 의해 결정된다. 또

한 피처리물의 전처리로서 유기물에 의한 오염, 피처리물의 미세공이나 핀홀 등의 오염, 표면의 녹 등으로 인한 피막의 결합이 발생할 수 있다. 이러한 오염물의 세척 및 코팅 전의 이온에 의한 전처리 세척 과정이 중요하다. 이온에 의한 세척후에는 피처리물의 온도, 인가전압 등이 밀착력을 좌우하는 요인이 된다. 피막의 합성과정에서 피막결정의 구조적인 결합과 마이크로한 드렘렛에 의한 영향은 국부적인 조성과 부착력 디스로케이션 등에 의한 부식 및 피로 파괴, 균열의 원인이 된다.

피막의 조성, 결정배향, 내부응력 등은 피막의 특성을 결정짓는데 매우 중요한 요인이라 할 수 있다. 화합물 합성 시 화합물의 조성은 화학 양론적인 화합물의 합성이 중요하지만 조성에 따른 기계적인 특성(경도)에는 크게 영향을 주지는 않는다. 그리고 결정의 배향성과 관련하여 화학 조성과 결정구조가 같더라도 피막의 성장환경인 기층의 종류와 결정방향, 공정온도, 인가전압, 가스압력 등의 요인에 의해 달라진다. 피막의 내부 응력은 피막과 기층의 열팽창계수 차에 의한 응력과 피막의 성장시에 발생하는 결합에 의한 응력으로 나눌 수 있으며 결합에 의한 응력은 온도에 따라 영향을 받으며, 증착 속도

에 따라서도 차이가 있다.

4. 국내 표면처리기술의 현황과 전망

4.1. 국내 시장규모 및 전망

국내 플라즈마 건식 표면처리 관련업체는 분야별로 장치제조 및 부품업체 약 40개, 플라즈마 표면처리 전문업체 약 20개 그리고 제어계측 및 플라즈마 전원 제조업체 약 10개인 것으로 조사되었다. 한국과 아시아에서 진공 및 플라즈마 기술의 응용에 대한 대표적인 제품과 장비의 시장현황은 다음과 같다. 표면보호 시장은 총 시장규모는 약 1.8억\$, 절삭용 코팅공구 시장은 약 1.2억\$, 기계 부품시장은 약 2.4 백만\$ 규모이다. 그러나 플라즈마 표면처리 규모는 총 시장규모의 2%~10% 정도를 담당하고 있는 실정이다. 그러나 1995년 세계무역기구(WTO)의 출범으로 주요 선진국들은 환경공해 유발 재료를 포함하는 부품이나 제품의 수입제한 조치가 이루어져 무역에 있어 커다란 장벽으로 대두될 것이므로 무공해 청정기술인 플라즈마 표면처리기술의 응용 및 시장은 꾸준히 증가되리라고 예상된다. 또한 생산과 수입에 있어 반도체 이외의 분야에 사용되는 진공 및 플라

표 3. 진공 및 플라즈마 응용분야에 대한 한국과 아시아의 시장현황

응용 분야	국내 시장 규모 (단위: 백만\$)	생산	수입
표면보호 (Mold & Die)	180	15	165
절삭공구 (TiN, cBN, HfC, TiC 등)	122	20	102
기계부품 (Nitriding, Carburizing 등)	2.4	0.1	2.3
광학 (Camera, CCTV, OA 기기 등)	36	11	25
자동차 부품 (실린더링, 연료분사노즐 등)	1.5	0.1	1.4
반도체칩 (메모리, 비메모리)	22,200	17,000	5,200
전자 (LCD, PDP 등)	150	65	85

산출근거 : Semicon Annual Report '99,
 한국일보 사설칼럼 "플라즈마의 중요성"(2001/4/6)
 KORDIC "플라즈마 열분해"(1999/3/9)
 ETRI IT 정보센터 "정보통신40대 품목 기술/시장보고서"
 매일경제 "고밀도 플라즈마CVD 장치시장 진출"(2000/6/9)

표 4. 박막 응용제품에 대한 전세계시장 현황

응용 분야	전 세계 시장 규모 (단위 : 백만\$)		
표면 보호	138	1995년	
	294	2005년	
	460	2010년	
장 식	30		
	54		
	140		
광 학	246		
	360		
	490		
광 전자	54		
	96		
	253		
전 자	174		
	540		
	684		
데이터저장	216		
	666	800	
배리어응용	96		
	204		
	420		
의 공 학	12		
	24		
	200		

즈마 장비의 수입규모는 1,056 백만\$로 나타나고 있어 금형, 절삭공구, 기계부품 분야의 기술개발이 절실히 요구된다.

4.2. 전세계 시장규모 및 전망

진공 및 플라즈마 공정 장치에 대한 세계시장 및 지역별 점유율은 아시아는 전자와 광전자 산업이 주도를 하는 반면에 독일과 유럽은 표면보호에 치중되어 있다. 진공 및 플라즈마 공정에 의해 처리되는 전세계시장의 현재규모와 잠재시장을 분석한 결과 장래에 전망이 매우 큰 분야는 표면보호, 광학, 배터리, 의공학 등임을 알 수 있다. 그래서 국내에서도 잠재시장의 성격상 표면처리분야의 실질적인 기술개발을 통해 선진국과 경쟁해야 할 것이다.

선진국에서는 이미 표면처리 산업과 관련한 첨단산업인 진공 산업 및 플라즈마 기술기반이 확고히 구축되어 있어 각 국가별로 거의 100% 자국의 기술로 국산화되어 있는 동시에 대 규모 연구개발투자 및 관련 전문인력 양성으로 기술개발 속도가 급격히 진전되고 있다. 특히 산업 고도화에 따른 고부가가치의 고기능 제품개발에 거의 모든 산업분야에서 활발한 연구개발의 진행됨에 따라 표면처리에 대한 각 산업계의 관심이 상당히 증대되어 기술개발 속도가 가속화되고 있다.

5. 맺음말

진식 표면처리기술은 TiN 코팅을 시초로 하여 질

화물, 탄화물, 탄소 등의 코팅을 절삭공구, 금형 제품, 자동차부품, 기계부품, 전기·전자 부품 등에 적용하여 실용화하고 있다. 이러한 표면처리기술 중에서 가장 보편적 이온 플레이팅법에 의한 하드코팅에 대해 기술하였고 독일이나 일본에서 널리 보급되어 실질적인 양산화 공정을 수행하는 아크 방전법을 소개하였다. 향후 하드코팅분야의 연구방향은 천이금속의 질화물, 탄화물의 다층 복합코팅 등 초고속가공을 위한 기능성 코팅 개발이 이루어질 것이고 열처리 및 질화 처리와 하드코팅이 복합된 복합 공정 개발이 진행될 것이다.

산업의 고도화와 더불어 국내의 표면처리 분야에도 기술 개발을 통한 선진국과의 경쟁을 해야한다. 세계는 지금 환경오염물의 규제와 수입 제한조치가 취해지고 있고 선진국에서는 이미 진공 및 플라즈마 산업에 대한 기반구축과 연구개발과 연구인력 확충을 통해 다가올 잠재시장을 선점하기 위해 힘쓰고 있다. 따라서 국내에서도 청정 산업인 표면처리분야의 기술개발을 통해 국가 경쟁력 제고에 힘

써야 할 때가 된 것이다.

참고문헌

1. C. Subramanian, K. N. Strafford, T. D. Wilks and L. P. Ward: Journal of Metals Processing Technology, 56 (1996) 385-397.
2. D. T. Quinto: Int I. Journal of Refractory Metals & Hard Materials, 14 (1996) 7-20.
3. Horst Heidsieck: Surface and Coatings Technology, 112 (1999) 324-338.
4. B. North: Surface and Coatings Technology, 106 (1999) 129-134.
5. Hermann A. Jehn: Surface and Coatings Technology, 131 (2000) 433-440.
6. L. A. Dobrzanski: Journal of Metals Processing Technology, 109 (2002) 44-51.
7. 독일 METAPLAS사 ARC 장비 기술자료.
8. 일본 KOBELCO AIP 장비 기술자료.
9. (주)공업저널 뉴스, 월간(메탈넷 코리아).
10. "2000년을 향한 산업기술 개발 수요", 통산산업부, 1995.