

D-Gun과 Plasma에 의한 금속과 세라믹의 코팅기술과 기계공업에서의 이용



강 석 춘

공군사관학교 기계공학과

● 1949년생.
● Tribology을 전공하였으며, 기계의 마찰, 마멸 및 윤활에 관심을 가지고 있다.

1. 머리말

D-Gun과 plasma 코팅이라고 하는 코팅(도금) 기술은 1950년대 미국 유니온 카바이드사에 의해 세계 최초로 개발되어 실용화된 이래 전세계의 산업전반에 걸쳐 꾸준히 그 응용분야가 확대되어 왔으며, 오늘날에는 정보 제트 여객기의 엔진으로부터 석유화학설비, 재철제강설비, 섬유기계, 인쇄기계, 제지기계, 식품기계, 발전설비, 자동화부품, 전자제품 등에 이르기까지 각종 산업기계 및 제품 생산에 응용되고 있다.

특히 최근에는 이들 산업기계가 고속화, 고성능화, 고품질화됨에 따라 그 구성부품도 필연적으로 고성능의 내구성 등이 요구되어 세라믹 등 특수 코팅의 필요성이 절실히 요구되고 있다.

2. D-Gun과 플라즈마 코팅

이 코팅은 미국의 유니온 카바이드사가 개발한 단단한 금속 표면의 도금(hardfacing) 기법으로서 디토네이션 건(detonation gun) 및 플라즈마(plasma) 용사장치를 사용하여 분말상태의 복합된 세라믹, 금속, 특수합금들의 코팅재를 금속 소재의 표면에 용사공하여 강인한 피막층을 형성함으로써 기계부품 및 금속제품의 내마모성, 내식성, 내열성, 내약품성 등

을 향상시키거나 필요에 따라 전기 전도성, 절연성, 열전도 제어특성 등을 부여하기도 하며 독특한 외관을 부여하는 방법으로 사용한다. 뿐만 아니라 재래의 용접이나 물리 혹은 화학적 도금방식으로는 해결할 수 없는 부품의 생산, 수리, 재생에 매우 유용한 기술이다.

2.1 D-Gun 코팅(폭발용사법)

D-Gun 코팅은 1940년대 후반 아세틸렌 가스의 폭발기구 연구과정에서 개발되어 1953년 최초로 실용화된 기술이다.⁽¹⁾ 처음엔 항공기용 제트 엔진의 개발과정에서부터 시작하였는데 그 탁월한 성능으로 인해 타산업분야에까지 응용되었고 계속 그 응용분야는 확대되어 현재는 산업 전반에 걸쳐 광범위하게 응용되고 있다.

이 기술은 그림 1과 같은 디토네이션 건(detonation gun)이라는 특수 폭발 장치를 사용하여 폭발기구 내에서 산소와 아세틸렌의 혼합가스가 폭발할 때 나오는 고속 에너지를 이용하는 방법이다. 폭발시 발생하는 마하 10에 가까운 초고속의 충격파로 반응용상태의 분말 코팅재를 분사하여 소재 표면에 마하 2(약 760 m/sec)의 속도로 충돌시켜 초경 마이크로 피막을 형성하는 방법이다.⁽²⁾

2.2 플라즈마 코팅(Plasma 용사법)

유니온 카바이드사는 "플라즈마 아크"의 연구와 경험을 토대로 1957년에 세계 최초로 "플

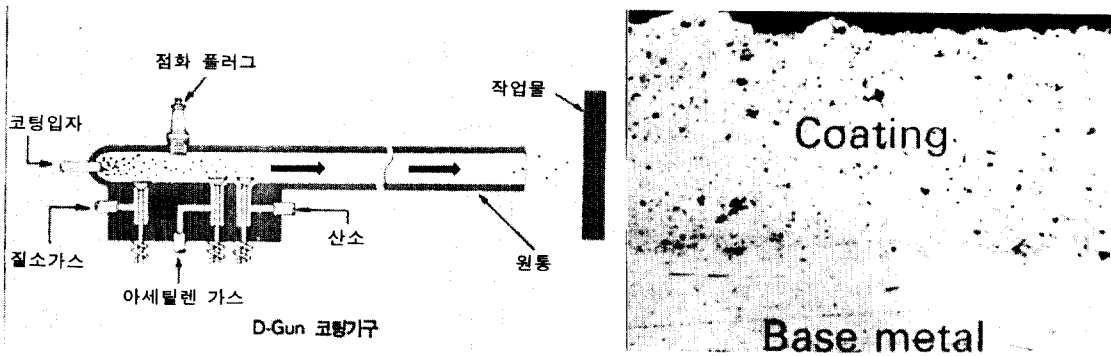


그림 1 D Gun 코팅 장치와 코팅 단면

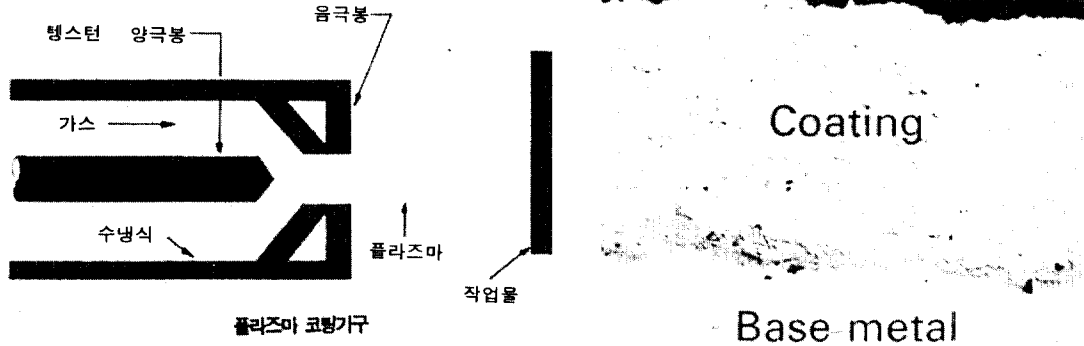


그림 2 Plasma 코팅 장치와 코팅 단면

라즈마” 용사장치를 그림 2와 같이 개발하여 보급시킨 것으로 이후 꾸준한 기술개발을 통해 이를 개량하여 현재의 독특한 시스템을 완성하여 널리 이용되고 있다.⁽³⁾

“플라즈마” 용사법은 비전이형 “아크(arc)”에 의해 불활성가스로부터 생성되는 고속(350 m/sec), 고온(중심온도 약 16,700°C)의 “플라즈마” 흐름을 사용하는 코팅방법으로서 플라즈마 용사장치 내에서 일정하게 공급되는 분말 코팅재는 완전 용융된 상태로 음속으로 소재에 충돌하여 치밀한 코팅피막을 형성해 준다.

3. D-Gun과 Plasma코팅의 특징

(1) 탁월한 내마모성 초경(超硬) 코팅을 할 수 있다.

코팅의 품질은 최종적으로 코팅 피막의 요구 특성 즉 내마모성, 내식성 등으로 평가된다. 이러한 특성은 코팅재의 고유경도(hardness), 코팅피막의 견고성(접착강도; bonding strength), 피막의 치밀도(低氣孔率; porosity)에 의해 좌우되며 이 세 가지 요소가 모두 양호해야 우수한 요구 성능을 발휘할 수 있다. 특히 피막의 접착강도와 기공률이 불량하면 코팅재의 경도가 높아도 전체적인 내마모성은 현저히 저하된다. 피막의 접착강도와 낮은 기공률은 코팅할 때 그림 3과 같이 용사에너지에 비례하며 용사 에너지는 코팅입자의 비행속도의 제곱에 비례한다.

D-Gun법은 그림 4와 같이 음속의 2배가 넘는 속도로 용사되므로 다른 어떤 코팅기구로도 따를 수 없는 탁월한 표면 코팅을 해줌으로써

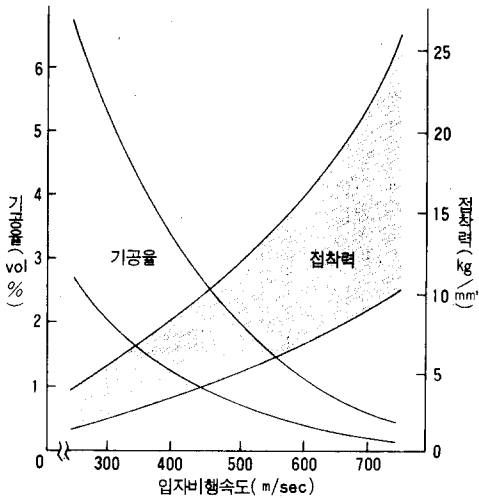


그림 3 입자의 비행속도와 기공률 및 접착력과의 관계

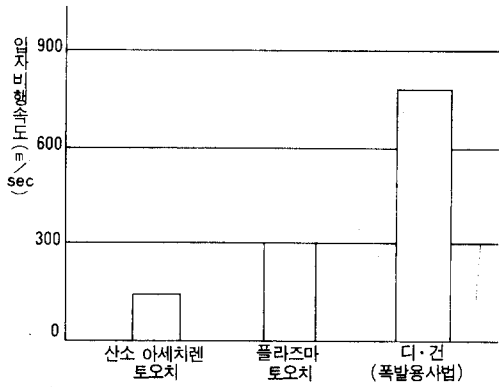


그림 4 용사 방법과 입자의 비행속도

부품의 수명은 재래 가공품에 비해 수배에서 수십배에 이르는 경이적인 내구성을 갖는다.

(2) 특수냉각 방식으로 열에 의한 가공물의 변화가 없다.

D-Gun 및 플라즈마 용사장치에는 모재가 150℃를 넘지 않는다. 따라서 가공물의 금속의 조직변화나 열변형 등이 전혀 발생하지 않는다. 가열하지 않고 코팅이 가능하여 가공물의 온도가 낮다.

(3) 항상 일정한 품질을 보장하는 정밀 코팅이 가능하다.

D-Gun의 1회 폭발로 형성되는 용사 피막의

두께는 약 6미크론(0.006mm)으로서 이렇게 미세한 두께를 적층하여 요구되는 두께를 만들어내는데 이 때 컴퓨터 제어에 의한 로봇 방식의 정밀 코팅장치를 사용하여 전면에 걸쳐 균일한 코팅 피막을 형성한다. 표준화된 프로그램과 세밀한 제어 시스템을 채택함으로써 복잡한 형상의 부품일 경우에도 부품 간의 품질 차이가 없는, 항상 일정한 품질의 코팅을 보장할 수 있다.

(4) 다양한 코팅 종류와 표면 가공으로 용도에 적합한 코팅을 선택할 수 있다.

이 코팅은 코팅 분말의 종류 및 방법에 따라 각기 다른 특성을 갖고 코팅의 종류가 대략 100여 종류나 된다. 따라서 여러 가지 상황에서 발생되는 마모, 부식, 취화 등에 대비하여 코팅을 적절히 선택할 수 있는데 내마모성은 물론 내식성, 내열성, 내산성, 내알칼리성 및 전기절연성 또는 전기전도성, 열전도성 코팅과 손상 부분의 수리를 위한 육성가공 코팅 등 적합한 코팅을 할 수 있다. 또한 코팅 표면의 최종 마무리 가공이 다양하므로 경면가공(mirror finish)에서부터 거친 가공에 이르기까지 용도에 가장 적합한 표면조도(surface roughness)를 제공한다.

(5) 반복 코팅이 용이하다.

일단 코팅된 부품이라도 사용 중에 필요하거나 정기적인 마모로 재수리를 해야 할 경우 몇 번이라도 반복 코팅하여 사용할 수 있다. 따라서 모재에 큰 손상이 없는 한 부품을 영구적으로 사용할 수 있으므로 많은 분야에서 이 방식

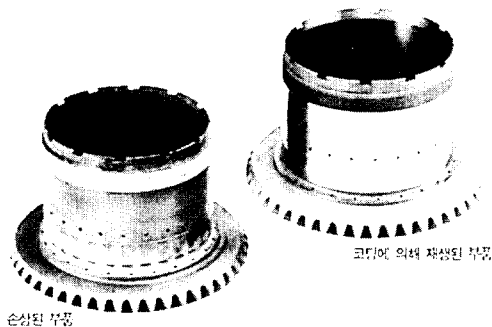


그림 5 손상된 부품과 재생 작업후의 부품

을 이용하여 부품 구입비를 절감할 수 있다.

(6) 저렴한 비용으로 우수한 부품을 제작할 수 있다. (경제적인 부품설계 및 소재선택이 용이하다.)

지금까지는 값비싼 재료의 모재를 사용한 것을 가볍고 값싼 재료로 제작한 뒤에 표면에 코팅을 함으로써 전체적으로는 저렴한 비용으로 오히려 내구성이 더 좋고 우수한 특성을 갖는 부품을 제작하여 사용할 수 있다.

실제로 스테인레스강을 소재로 하던 롤러를 알루미늄으로 제작한 후 메탈코팅을 하는 방법을 개발하여 사용하는 예가 많이 있다. 이로 인한 제작비 자체의 절감은 물론, 기계가 경량화되어 에너지 절감 및 취급의 용이성 등 부수적인 이점들도 얻을 수 있다.

(7) 마모 및 손상 부품을 손쉽게 재생한다.

그림 5와 같이 사용중 마모되거나 손상된 부품도 상태에 따라 적절한 수리(肉盛코팅 포함)와 코팅으로 실패품과 같이 재생하여 더 오래 사용할 수 있다. 특히 비싼 부품일 경우 약간의 마모나 손상으로 인해 품목 전체를 폐기시킬 필요가 없게 된다.

4. D-Gun과 Plasma 코팅의 응용분야

다음과 같은 목적으로 사용할 수 있다.

- (1) 일반 소재의 내마모성(abrasion, erosion, fretting, galling 방지) 및 내부식성(corrosion, oxidation 방지) 증대
- (2) 마모, 손상 부품을 원래의 규격으로 재생, 수리 또는 교정
- (3) 마찰계수의 저하 또는 증대
- (4) 열차단(thermal barrier) 또는 열전도성 향상
- (5) 전기절연(insulation) 또는 전기전도성 부여
- (6) 외관의 개선

5. D-Gun 및 Plasma 코팅의 물리적 성질

일반적으로 사용되는 코팅재 및 특성과 응용

의 예가 표 1에 열거되어 있다.

6. 실제응용분야

6.1 항공우주산업

(1) 가스터빈 엔진(제트 엔진)

초음속 대형 여객기나 보다 고성능의 군용 제트엔진 제작 및 수리분야에서 D-Gun 및 plasma 코팅의 사용은 필수적이다.

Pratt and Whitney, General Electric, Rolls Royce, Allison 등 세계 주요 항공기 엔진 제작사의 제작도면 및 수리정비 지침에 D-Gun 및 plasma 코팅을 사용하도록 표준화되어 있다. 혹심한 운항조건에서도 전천후의 고도 정밀성, 내구성, 안정성과 아울러 손쉬운 반복 정비를 요하는 이 분야에서는 사용 소재를 선정할 때 극히 까다로운 요구조건을 충족시켜 주어야 하는데 이 코팅만이 이러한 사양을 충족시켜 주고 있다. 고온 및 저온하에서 각종 충격, 마찰, 부식, 침식, 풍화 등에 견디어 내도록 다음과 같은 부품들에 세라믹 등의 코팅을 사용하고 있다. 그림 6은 제트 항공기 엔진에서 코팅이 사용되는 부분이며 그림 7은 부품의 일부에 관해 보여주고 있다.

그림 6에서 코팅부분은 아래와 같다.

- fan and compressor blades
- airfoils
- compressor disk and hubs
- bearing seal assemblies and seats

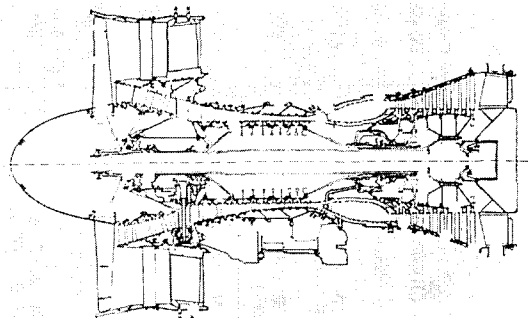


그림 6 제트엔진에서 코팅기술이 응용된 위치

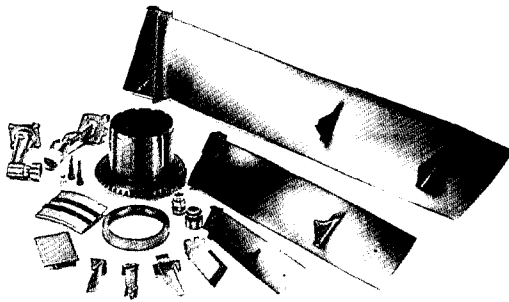


그림 7 제트엔진의 코팅을 응용한 부품들

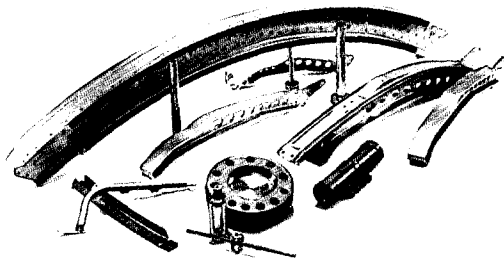


그림 8 항공기 동체에서 코팅 기술의 응용

- bevel gears
- outer airseals
- turbine blades
- rings
- 기타부품

(2) 동체부 (Airframes)

각종 민간용 항공기나 군용 항공기의 여러 동체부품에도 내마모, 내식을 위한 세라믹 코팅이 그림 8과 같이 채택되고 있다. 특히 이 분야에서는 매우 중요한 설계 중점이 동체 중량의 경감인데 세라믹 코팅을 응용함으로써 부품소재의 경량화에도 불구하고 오히려 내구성의 향상, 정비비의 현격한 절감을 꾀하고 있다. 사용부품은 아래와 같다.

- 구조부품
- 제어부품
- empennages
- nacelles
- hydraulics and pneumatics
- bearings

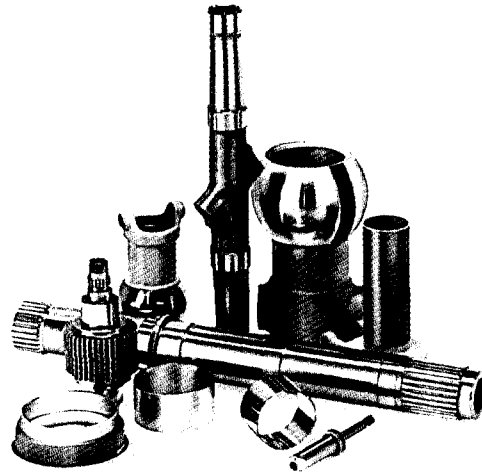


그림 9 헬리콥터의 코팅 응용된 부품

- power plants
- thrust reversers 등

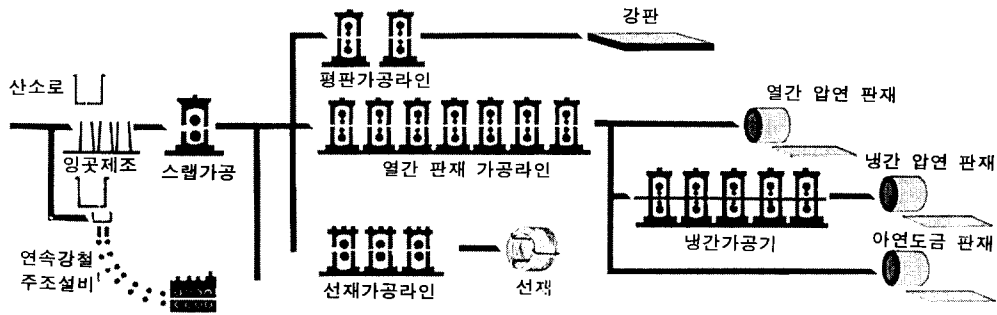
(3) 헬리콥터

각종 민간용, 군용 헬리콥터 부품의 내마모, 내식 가공에도 세라믹 등의 코팅 기술이 그림 9와 같이 채택되고 있다. Sikorsky, Bell, Hughes 등 세계 유수의 헬기 제작사 및 사용 국가별로 엄격한 품질규격과 다양한 사양이 요구되는 이 분야에서 세라믹 코팅이 광범위하게 사용된다.

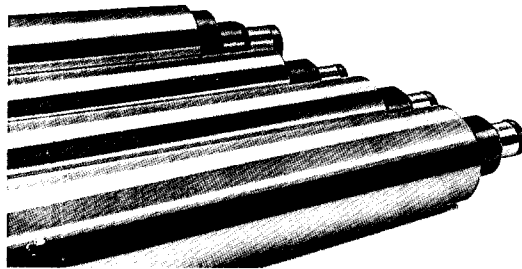
- main rotor swashplate pivot sleeves and supports
- rotor blade extension sleeves
- main rotor shafts
- blade radius rings
- blade lock pins
- cylinder assemblies
- pitch lock/piston assemblies
- tail rotor hubs
- blade bolts
- pinion gears
- main rotor pistons
- inner race bearings

6.2 제철 제강 산업

철강산업에 사용되는 그림 10과 같은 각종



a) 제강 과정에서 압연롤러



b) 코팅된 롤러

그림 10 철강산업에서의 세라믹 코팅 이용

롤(rolls) 및 가이드, 플레이트 등의 마모나 픽업(pick-up) 문제의 효율적인 해결방법으로 세라믹 코팅이 폭발적으로 보급되어 이용되고 있다. 세라믹 등의 코팅의 사용으로 이들 롤 및 부품의 사용수명이 중전에 비해 수배에서 수십배까지 올라올 정도로 연장되므로 이로 인한 운전 능력의 현저한 상승 및 인력의 절감을 꾀하고 마모된 롤 및 부품도 코팅면의 재연마 또는 재코팅으로 모재의 손상 없이 반복 사용이 가능해짐으로써 고정 투자비를 절감할 수 있다. 또한 탁월한 표면 특성(특히 픽업 방지)은 제품의 품질과 상품 수율을 눈에 띄게 높여 주므로 제품의 경쟁력과 이익률이 현저히 증대된다. 특히 세계적 추세인 생산 라인의 고속화, 자동화, 성력화와 아울러 자동차 및 가전 제품용 강판의 고품질화 요구에 따라 연속압연, 소둔, 산세, 아연도 라인에서 이러한 장점이 완전히 입증됨으로써 세라믹 등의 코팅 사용은 이제 보편화되어 있다. 사용분야는 아래

와 같다.

- 연속산세 라인(롤러 가이드, upcoiler 크래들 롤, 텐션 릴 등)
- 냉간압연 라인(pay off 만드렐, 브라이들/덴션 롤, 텐쇼미터 롤, 디플렉터 롤)
- 연속 소둔 라인(CAL), temper mills, 스키티 라인, 전기아연도, 크롬도금 라인, 갈바나이징, 알루미늄이징 라인 등(hearth roll 등)
- 링거 롤(wringer roll)
- 엔드 실 플레이트(end seal plate) 등

6.3 섬유산업

폴리에스터, 나이론 등 합성섬유 제조 및 가공 공정에서 장섬유(filament) 및 단섬유(staple fiber)와 접촉하는 각종 롤러, 커터(cutter) 등의 내마모성 향상 및 표면마찰계수의 조절을 목적으로 세라믹 코팅이 사용된다. 또한 직기 부품의 내구성 향상을 위해서도 사용된다. 사

용부품은 다음과 같다.

- 방사, 연신, 가연기 등의 grooved rolls, godet rolls, separator rolls, draw rolls, feed rolls, oiling rolls, heater plates, hot plates, take-up rolls 등
- 가연기용 friction discs
- tow cutter blades, crimper rolls, staple draw rolls, water squeezing plates
- spin draw 및 draw twist 기의 draw rolls
- finish applicator rolls
- package drive rolls
- guide pins
- 방사용 미터링 펌프 플레이트 등
- 고속 직기용 바디(reeds), projector, rapier swing plates, cutter base, feed drum, disk grip
- open-end 용 rotor 등

6.4 플라스틱 공업

합성수지 공업에서 수지 생산시에 투입되는 각종 강화재, 착색제, 충전제 등은 기계부품의 마모를 가속시키며 마모와 부식이 복합적으로 발생되어 부품의 수명은 더욱 짧아지게 된다. 특히 최근에는 고강도의 공업용 강화 플라스틱의 개발에 따라 배관재, 밸브 등에까지도 심한 마모가 발생된다. D-Gun 코팅은 이러한 문제들을 해결하여 기계의 수명연장, 가동률의 제고와 제품의 품질향상에 탁월한 효과를 입증함으로써 널리 사용되고 있다. 사용분야는 아래와 같다.

- 사출기, 압출기용 스크류, 배럴 등 (extruder and injection screws, barrels)
- size reduction equipment, 다이플레이트 (pelletizing die plates)
- perforating and slitting equipment
- rolls
- non-return valves

6.5 석유화학 공업

세라믹 코팅은 석유화학플랜트 설비부품에

내마모, 내식, 내약품성을 부여함으로써 사용 수명을 현저히 연장시킨다. 증전의 유사한 표면처리만으로는 비교적 짧은 기간밖에 사용하지 못하던 부품도 세라믹 코팅의 사용으로 수배에서 수십배의 내구성을 발휘할 수 있다. 사용중 마모되거나 손상된 부품의 경우에도 공장에서 수리, 재생하여 완전히 신품과 동일한 규격으로 보다 향상된 내구성을 부여한다. 사용 부품은 아래와 같다.

- 터빈, 원심 콤프레서 및 펌프의 로터샤프트, 임펠러, 블레이드 등
- 왕복식 콤프레서 및 펌프의 rods, plungers
- power recovery expander rotor blades
- gate valves
- ball valves
- mechanical seals

6.6 기타 산업

- (1) 제지 및 골판지 기계
 - corrugating rolls
 - hydro foil blades
 - paper trimmer knife
 - calender rolls
- (2) 사무기기 및 컴퓨터
 - 메모리기기용 magnetic tape head
 - printer dot pins
 - memorex carriage
 - copying drum
- (3) 공구산업
 - 각종 tools
 - insulated tools
- (4) 자동차산업
 - 세라믹 엔진부품
 - crank shaft wear sleeve
- (5) 포장용 캔
 - seaming chuck
- (6) 발전플랜트
 - 핵연료튜브
 - 제어봉 구동장치

- 각종 배관부품
- (7) 식품기계
- bread guides
- cutter
- (8) 인쇄기계
- 프렉소 인쇄용 (flexography) anilox roll
- (9) 담배제조
- tobacco cutting knife
- (10) 필름제조
- casting drum
- draw rolls
- (11) 일반제품
- 안경테
- 시계 case 등
- 골프채
- (12) 프레스 금형
- (13) 각종 베어링, 샤프트

7. D-Gun과 Plasma 코팅 공정개요

코팅방법과 전후가공공정이 설계되면 공정별로 필요한 masking 및 fixture가 제작되며 순서대로 공정에 투입된다. 필요시에는 undercutting 및 undercoating을 하게 되며 buffing, drilling 등을 행하기도 한다.

코팅 후의 처리공정도 또한 요구되는 규격에 따라 "As Coated" 또는 brushing, sanding, grinding, lapping, blasting 등으로 처리되며 경우에 따라 shot peening, heat treating 등을 거친다. 모든 전후 처리 가공은 모재의 상태, 코팅의 종류, 요구 규격에 따라 적합한 가공기구

및 방법을 사용해야 작업방법의 사소한 차이로 인해 코팅표면의 성능에 있어서 큰 차이가 난다. 축적된 경험과 기술없이 코팅 성능의 재현이 불가능하다. 모든 코팅은 사전에 시험 코팅을 한 후 코팅된 견본에 대한 철저한 분석을 한 다음 본작업으로 들어간다. 이러한 분석은 물리, 화학, 금속공학적인 분석방법에 의하여 이루어지며 내부 규격에 따라 각 세부항목별로 검토한다.

8. 맺음말

이상에서 D-Gun과 Plasma에 의한 세라믹 등을 금속에 코팅하는 기술과 산업에서의 그 응용에 관해서 자세히 살펴보았다. 앞으로 세라믹 등의 코팅 기술을 이용하는 분야가 점점 넓어지고 특히 기계공업 등에서 그 이용 효과가 매우 커질 것으로 확신한다.

참고문헌

- (1) Bunshah, R.F., 1982, "Deposition Technologies for Films and Coating (Developments and Applications)," Noyes Publications.
- (2) Poorman, R.M., Sargent, H.B., and Lonpary, H., 1955, "Method and Apparatus Utilizing Detonation Waves for Spraying and Other Purposes," U.S Patent 2.714.553.
- (3) Tucker, R.C., Jr and Bishop, T.N., 1978, "Utilization of Plasma and D-Gun Coating in Design," AIME Symposium. 