

表面 코팅技術의 應用

安 孝 錫

〈韓國科學技術研究院 Tribology研究室 · 工博〉

1. 서 론

최근 항공기, 자동차 등의 수송기계에서부터 발전용 터빈 등에 이르기까지 기계공업 전반의 급속한 발달과 더불어 각종 기계들이 전문, 특수화됨에 따라 이들의 작동조건 역시 고속, 고하중화되어가며 이에 따라 사용되는 재료들이 그 가혹한 상태에서 원하는 기간 이상 제 능력을 발휘해야 하는 필요성에 직면하고 있다.

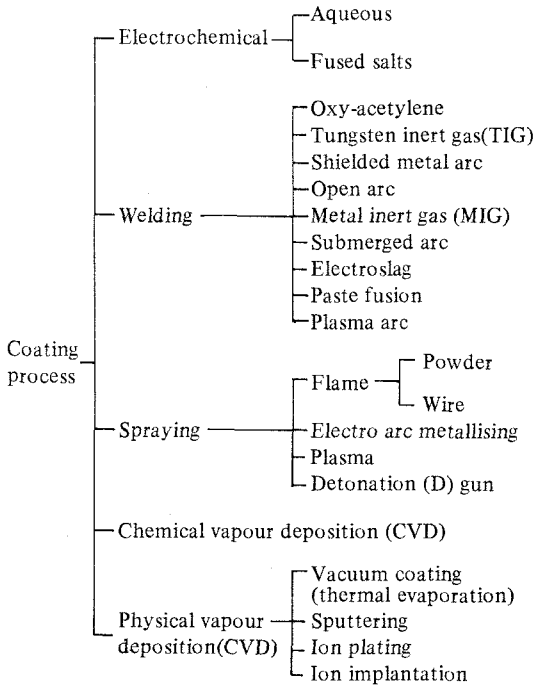
일반 기계요소에서 발생하는 파손현상(failure/damage)은 본질적으로 접촉표면 및 부표면(sub-surface)에서 시작되며 이는 표면층(surface layer)이 마모, 부식, 피로 등의 표면과 관련된 물리적 현상에 대한 대응능력이 결핍되거나 부족하기 때문에 발생하게 되는 것이다. 따라서 일반 금속재료로서는 표면층을 최적의 트라이볼로지(tribology : 마찰, 마모, 윤활을 연구하는 학문분야)적 성질-내마모성, 내부식성, 고강도 등-을 발휘하기가 곤란하기 때문에 이러한 문제점을 해결하기 위한 방안으로 재래의 금속재료 표면에 목적하는 특성을 발휘할 수 있는 물질을 입히는(코팅하는) 표면개질기술(surface modification technology)을 적용하여 그 표면의 특성을 향상시키기 위해 노력하고 있다.

현재 적용 가능한 여러 표면용 재료와 처리방법들 중 올바른 것을 선택하고 최적화하기 위하여는 두 가지 주된 분야에 대하여 잘 인지하여야 한다. 첫째로 산업장에서 일어나는 여러 가지 마모유형들

을 이해하여야만 설계단계에서 부적절한 표면처리가 배제될 수 있다. 둘째로 여러 표면재료와 표면처리들의 주된 특성들을 식별하여야 한다.

마모는 산업현장에서 부품교환의 원인이 되는 세가지의 가장 보편적 문제(마모, 피로, 부식)의 하나이며 마모가 큰 재해로 이어지는 경우는 드물지만 동력손실, 오일소비, 부품교환빈도 등을 증가시킴으로써 운전효율을 저하시켜 경제적 손실을 야기시킨다. 마찰과 마모는 재료의 고유성질들이 아니라 기계 시스템의 특성이다.¹⁾ 마찰과 마모 사이에는 간단한 일반적 관계가 존재치 않으며 종종 큰 변화의 마모가 상대적으로 작은 마찰을 수반하기도 한다. 하중, 속도, 환경의 변화에 대하여 마모율의 큰 변화가 있을 수 있다. 그러므로 특정한 문제에 대하여 일반적인 해결책을 적용할 때에는 많은 주의가 기울여져야 한다. 마찰과 마모는 운전조건을 조정함으로써 제어될 수도 있다. 예를 들어 엔진을 먼지가 많은 환경에서 운전할 때는 엔진으로 흡입되는 공기의 여과가 특별히 중요하다. 마찰과 마모는 여러 가지 방법으로 제어될 수도 있으나 Jones 등²⁾은 코팅을 위시한 표면개질기술이 향후 일 십년간 가장 중요할 것으로 전망했다.

표면개질기술은 많은 경우에 있어서 내마모성 표면층을 제공함으로써 모재를 비교적 값싼 재료를 사용하고도 질과 수명을 향상시킬 수 있는 경제적이고 효율적인 해결책이 된다. 표면개질기술은 설계 단계에서 또는 많은 경우 사용중 문제가 발생되었을 때 응용될 수도 있지만 전자의 경우가 더 강조되어



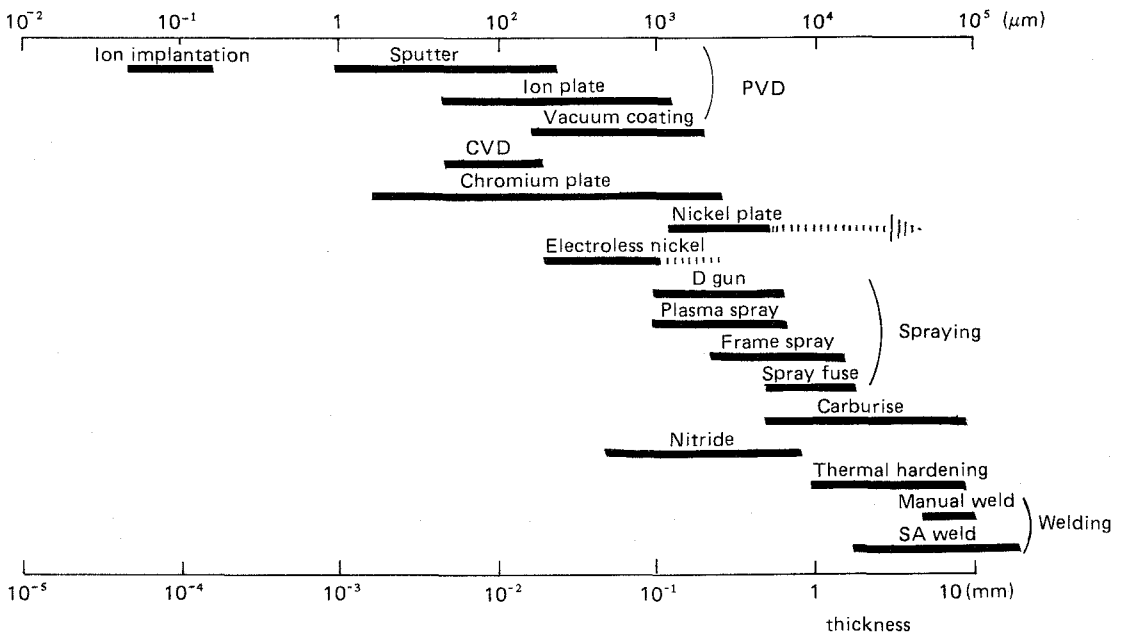
〈그림-1〉 트라이볼로지적 특성 향상을 위한 각종 코팅 기술의 분류도

야 할 것이다. 본고에서는 표면개질기술중에서 근래에 들어 발전을 거듭하는 표면코팅기술에 대해 간략히 알아보며 특히 산업현장에의 적용범위가 넓은 플라즈마 용사기술에 대해 소개하고자 한다.

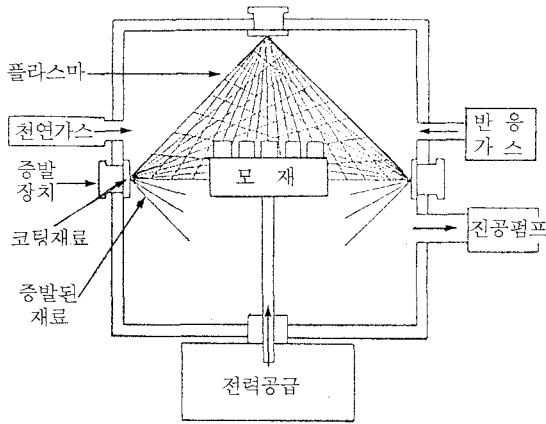
2. 코팅법의 종류 및 개략적 소개

코팅은 요소의 표면 위에 모재와 다른 물질을 덮어 씌우는 것으로서 치수변화를 수반하며 모재와 코팅층과의 경계를 사이에 두고 성분과 성질이 매우 뚜렷하게 변한다. 코팅으로서 표면 성질을 향상시키는 방법들이 개발된 것은 최근 십여년간 트라이볼로지 및 재료학적 기술의 가장 큰 업적 중의 하나이다. 표면 복합재료 또는 코팅된 기계부품들이 광범위한 작동조건하에서 현재 사용될 수 있으며 새로운 기술적 우위성을 갖고 있다.

코팅기술의 중요성은 연간 부식 또는 마모로 인한 손실을 고찰하면 알 수 있다. 산업화된 나라의 경우 그 값이 국민총생산량의 약 3%에 달한다. 일반적으로 재료의 파손은 사용중 표면-환경의 작용이 재료에 손상을 준 결과이다. 대부분의 경우 기



〈그림-2〉 재료 표면 코팅기술 분류도



〈그림-3〉 캐소드 아크를 이용한 증착장비

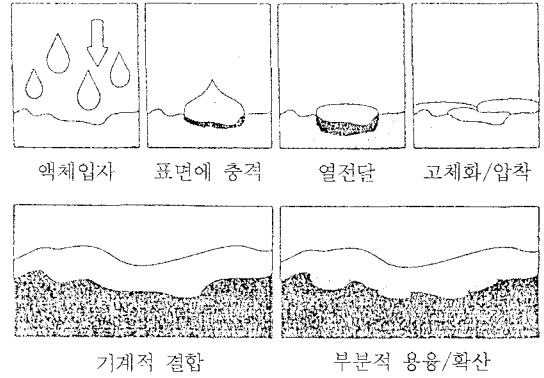
계부품의 퇴화는 세 단계를 거친다. 비교적 긴 첫째 단계에서는 환경적 요인에 의하여 표면이 점차 침식을 받는다. 둘째 단계에서는 재료의 전체적 성질이 영향을 받으며 피로와 크리프(creep) 균열이 성장한다. 셋째의 파손 단계에서는 균열이 급속히 부품의 단면으로 전파함으로써 부품이 과급적으로 파손된다.

합금으로서 재료 전체와 표면 성질들을 동시에 향상시키는 것이 경제성으로 볼 때에 스테인리스강처럼 쉽사리 해결되지는 않는다. 따라서 표면성질을 향상시키기 위하여 더 많은 주의와 관심이 쏟리고 있다.

〈그림-1〉에는 여러 가지의 코팅 방법들의 분류를 보이고 있으며 〈그림-2〉는 이들의 코팅 두께 범위를 나타낸다. 이들중 대표적인 몇 가지를 설명하며 그 중에서도 플라즈마 용사법에 대하여 좀더 자세히 설명하도록 한다.³⁾

1) 진공 증착 코팅(Vapor Deposited Coatings)

증착방법에는 화학적 증착(CVD, Chemical Vapor Deposition)과 물리적 증착(PVD, Physical Vapor Deposition)이 있다. CVD에서는 가스 형태의 화학 반응물들로부터 또는 탄화물과 같은 휘발성 화합물의 열분해로부터 모재 표면에 코팅이 형성된다. PVD에서는 코팅 재료가 증발하거나 튀어나와 모재에 코팅된다. 그 한 예가 〈그림-3〉과 같은 캐소드 아크 증착방법인데 이 방법은 캐소드 아크에



〈그림-4〉 열용사 원리

의해 증착원료를 증발시킨 후 진공실 내에 반응 기체를 주입시킨 다음 모재기판(-)에 고전압을 걸어 플라즈마를 형성시켜 증착원료와 기체와의 반응물질이 모재에 코팅되게 하는 방법이다.

최근의 관심은 절삭 공구에의 얇고 경한 코팅에 집중되어 있으며 예를 들어 텅스텐 카바이드 공구에 티타늄 카바이드를 CVD한 경우 공구 수명이 4 내지 10배 향상된 것으로 보고되고 있다.

증착기술 응용의 제한점은 다량의 부품이 동시에 처리될 때 경제성이 있으나 진공실 크기에 제한이 있기 때문에 코팅 모재의 수가 한정되며 CVD의 경우 모재의 처리 온도가 높아 많은 모재 합금들에 풀림현상, 열변형 등이 발생하기 때문에 모재가 제한된다.

2) 스퍼터링(Sputtering)

이 방법에서는 음전기가 걸린 코팅 재료가 아르곤과 같은 불활성 기체의 양이온에 부딪히면 원자들이 증발하며 이들은 이온화된 가스와 함께 전달되어 작업물의 표면에 코팅된다. 코팅 재료는 금속, 합금, 고체 윤활제, 산화물, 탄화물 등의 경한 재료에 이른다. 모재의 가열은 무시할 만하다. 이러한 코팅의 특성은 균일하며 매우 얇아 50~1,000nm의 범위이다. 이 방법은 시행 후 다듬질이 필요하지 않기 때문에 기체 베어링 또는 구름 베어링과 같은 정밀 요소의 내마모성 코팅 적용에 이상적이다.

코팅전에 역 스퍼터링하면 모재의 표면으로부터 오염 물질이 제거되어 응착성이 뛰어나게 된다. 매우 경한 재료도 작은 반경의 곡면에 균열이 생

기지 않고 코팅된다. 마모 수명은 다른 방법에 의해 1,000배 두껍게 된 코팅과 같을 정도이다.

3) 열용사 코팅 (Thermal Sprayed Coatings)

용사 코팅기술은 금속, 세라믹, 시멘트, 고분자 등의 입자를 용사기에 의해 가열, 용융시켜 날려줌으로써 높은 운동에너지를 가진 용융입자가 모재상에 충돌하여 편평하게 응고되어 적층됨으로써 피막을 형성시키는 기술이다. 따라서 용사중에 승화와 분해를 일으키는 특수한 재료를 제외하고는 거의 모든 재료의 용사가 가능하다.

용사프로세스는 <그림-4>에 나타난 바와 같이 기계적 결합 공정이다. 코팅 재료는 용융된 작은 방울들의 형태로 추진되어 공작물에 부딪혀 납작해지고 냉각되어 합착된다. 공정중 공작물의 온도가 증가하나 대체로 150°C를 초과하지 않는다. 일반적으로 코팅층의 밀도는 입자 속도의 함수이고 입자 온도의 함수는 아니다.

열용사의 경우에는 용사원료가 용사온도에 의해 제한이 되지만 플라즈마용사나 폭발 용사법은 매우 높은 온도로 용사재료를 녹이기 때문에 알루미늄과 같은 금속으로부터 지르코니아와 같은 비금속에 이르는 다양한 범위의 물질이 코팅에 응용될 수 있다. 한편 현재 산업현장에서 많이 응용되는 "용접에 의한 표면보강법(hard facing)"은 열용사에 비하여 더 밀도가 높은 코팅이나 공작물에 더 많은 열을 전달함으로써 공작물의 물리적 조적을 변화시킬 수 있고 얇은 두께의 공작물은 손상을 입을 수 있다.

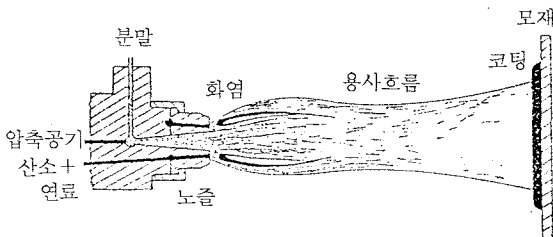
플라즈마 또는 폭발 용사기를 사용한 세라믹, 카바이드, 내화성 금속(Mo 또는 W) 코팅은 특별한 고급 내마모성을 나타낸다. 하지만 주된 단점은

직진성을 갖는다는 사실이다. 밀도와 응집력이 가장 높은 코팅은 표면에 수직으로 용사된 경우이다. 용사 각도가 줄어들어 따라 코팅 품질이 떨어지며 45° 이하는 피하는 것이 좋다. 내경 75mm 이하에 길이 100mm 이상인 구멍은 열방출 등의 난제로 인해 거의 불가능하다.

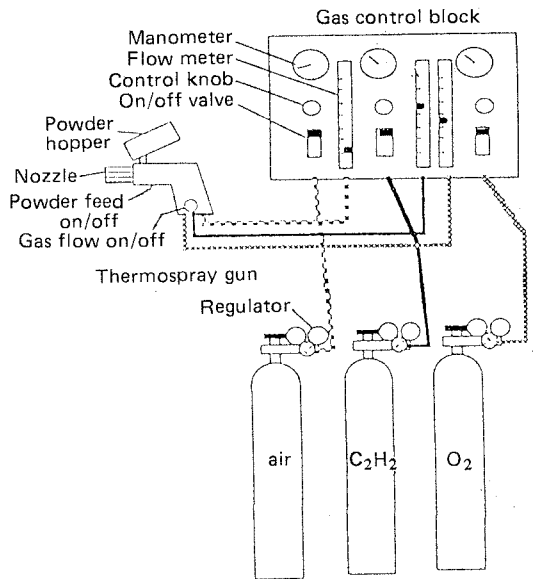
금속 용사를 위하여는 여러 가지의 가열 방법들이 사용되는데 산소-연료 연소일 경우 화염 온도가 1,900 내지 3,000°C이고 입자 속도는 2.5 내지 28m/s이며 아음속 연소의 경우 화염 온도 2,300 내지 3,300°C이고 입자 속도는 50 내지 1,760m/s에 이른다. 각각의 방법들(산소-연료 또는 화염 연소, 전기 아크, 플라즈마, 아음속 연소)의 특성을 비교하면 <表-1>과 같다. 코팅 재료의 용융온도, 코팅 두께, 공작물 형상이 코팅 공정의 선정에 영향을 준다.

(1) 화염용사법 (Oxi-fuel combustion, flame spray process)

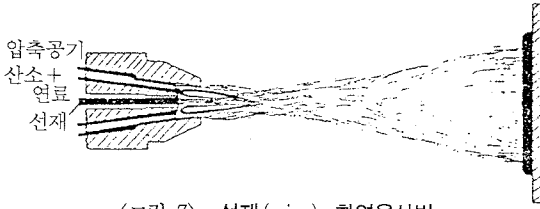
분말, 와이어(wire) 또는 봉(bar) 형태의 코팅 재료를 용융하기 위하여 산소-연료 연소법을 사용하는 열용사 방법중 가장 기본적인 방법이다. 코팅 재료는 연소화염의 온도보다 낮은 용융점을 갖는 것



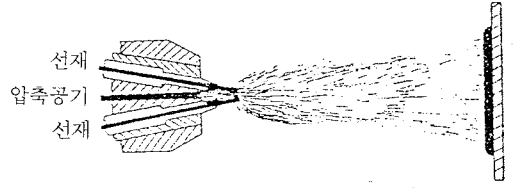
<그림-5> 분말 화염용사법



<그림-6> 분말 화염용사 장치도



〈그림-7〉 선재(wire) 화염용사법

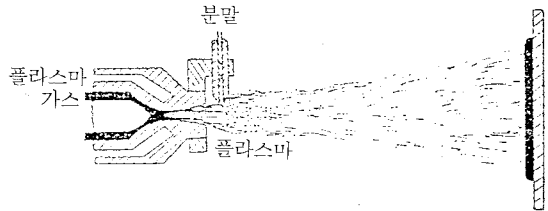


〈그림-8〉 전기아크 용사법

열용사 방법 비교도

〈表-1〉

특징	연소에 의한 기열		전기적 기열	
	화염용사	폭발용사	아크	플라스마
결합력	낮음	높음	낮음	높음
입자속도	낮음	매우 높음	낮음	높음
입자온도	낮음	낮음	높음	높음
코팅 품질	낮음	높음	낮음	높음
다양성	제한됨	제한됨	낮음	높음
생산성	낮음	높음	낮음	높음
지분투자비	매우 낮음	보통	낮음	높음



〈그림-9〉 플라스마 용사법

이 주성분이다. 〈그림-5〉는 분말을 이용한 화염용사법의 개요도이다. 분말이 사용될 경우에는 용융된 입자들이 연소가스의 흐름속도에 의하여 공작물에 전달된다. 분말 화염용사기를 이용한 용사시스템은 〈그림-6〉과 같이 구성된다.

〈그림-7〉은 선재 화염용사법의 개요도이다. 선재 또는 봉재로부터 용융된 입자들은 연소가스와 압축가스의 힘에 의하여 분말을 이용할 때와 같은 원리로 공작물을 향해 비산된다.

(2) 전기아크 용사법(Electric arc process)

〈그림-8〉은 전기아크 용사법의 개요도이다. 전기아크 용사법에서는 한 쌍의 선재가 아크내에서 용융되며 액적들은 압축공기에 의하여 추진된다. 입자속도는 산소-연료 연소법과 거의 같으나 액적의 온도는 더 높다.

(3) 플라스마 용사법(Plasma spray process)

〈그림-9〉는 플라스마 용사법의 개요도이다. 플라스마 용사법에서는 분말이 플라스마 용사기의 아크내에서 용융되고 플라스마 가스와 압축공기가 입자

들을 공작물로 추진시킨다. 산소-연료 또는 전기아크법보다 높은 속도로 액적을 모재에 비산시킴으로써 밀도가 더 높은 코팅을 만든다. 자세한 사항은 뒤에서 다루도록 한다.

(4) 폭발 용사법(Detonation Gun : High Velocity Oxyfuel)

〈그림-10〉은 폭발 용사법의 개요도이다. 가장 높은 내마모성의 표면을 생성시킬 수 있는 용사법이다. 1950년대에 미국의 Union Carbide에 의해 처음 개발된 용사법으로 연료와 산소가 폭발 연소실내에서 폭발해서 나오는 고속에너지를 이용해 분말 코팅제를 용융시켜 음속의 2배 정도의 속도로 액적을 모재에 충돌시켜 피막을 형성하는 방법이다. 출구의 노즐에 의하여 야기되는 구속작용은 화염 속도와 입자 속도를 다른 열용사법들에 비하여 가장 높은 수준으로 증가시킨다.⁵⁾

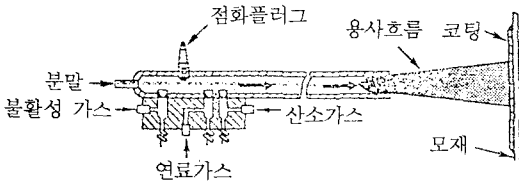
3. 플라스마 용사 코팅

최근 공업기술의 고속화, 고온화, 고압화, 경량화 및 소형화의 추세에 따라 기지금속 위에 세라믹 재료를 코팅하여 기지금속의 인성과 코팅된 세라믹재의 우수한 특성을 이용하기 위한 연구가 활발하게 이루어지고 있다. 일반적으로 기지금속 위에 세라믹재를 코팅하는 방법으로는 화학증착법(CVD : Chemical Vapour Deposition), 물리증착법

(PVD : Physical Vapour Deposition) 및 플라즈마 용사법(Plasma Spray Coating) 등이 있지만 이 중에서 플라즈마 용사법은 사용하는 가스(Ar, N₂, H₂)의 종류 및 양에 따라 3,000°C 이상의 고온, 고열을 얻을 수 있어(화염온도는 11,000°C까지 올라감) 용융온도가 높은 세라믹재도 쉽게 용사할 수 있다. 또한 증착법의 경우 원자단위의 적층에 의해 피막이 형성되지만 플라즈마 용사법의 경우 용융된 분말의 적층에 의해 피막이 형성되므로 단시간 내에 원하는 두께의 피막을 얻을 수 있는 장점이 있다.

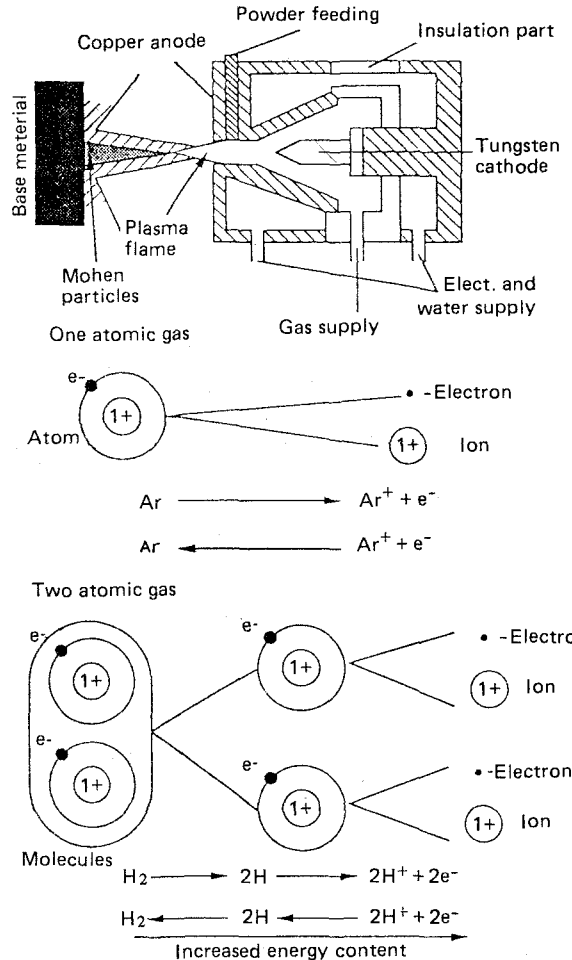
용사방법 자체는 화염용사코팅(Flamel Spray Coating) 법과 비슷한 방법이지만 용점이 3,000°C 이상인 세라믹 분말도 녹여 피막을 형성시킬 수 있는 것이 가장 큰 특징이며 입자를 가열, 가속시키는 열원의 종류에 따라 여러 가지로 분류되지만 아크 플라즈마를 이용하는 플라즈마 용사가 널리 사용되고 있다. 그러나 아크 플라즈마의 경우 고가의 가스를 다량으로 쓰기 때문에 운용비가 높은 단점이 있어 통상의 가스안정화 플라즈마 타입과는 다른 수안정화 대용량 플라즈마 용사기가 개발되었는데 이 용사기는 낮은 운용비, 고품질, 고능률의 특징이 있어 대형 기계부품의 세라믹 용사에 적용되고 있다. 또한 종래 주류를 이루고 있는 대기용사법의 단점을 보강한 방법의 하나로서 최근 감압분위기 중에서의 플라즈마 용사법이 항공기 관련부품의 생산에 응용되고 있다. 이 방법으로 얻은 용사피막은 산화가 적고, 예열온도를 높일 수 있기 때문에 기공이 적고 고밀착력의 피막을 얻을 수 있으며 원료 분말과 피막의 성분변화가 적어 용사효율을 높이는 이점이 있다. 이러한 새로운 용사법의 발달과 함께 용사피막의 성능도 다양화되고 있다.

4. 플라즈마 용사의 원리

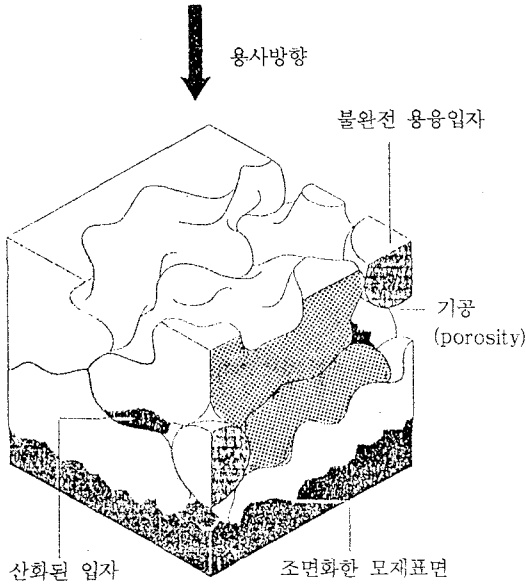


〈그림-10〉 폭발 용사법(Detonation Gun)

〈그림-11〉은 플라즈마 용사의 원리를 보다 상세히 보여주고 있다. 텅스텐 음극과 양극인 수냉 플라즈마건의 노즐 사이의 직류 방전장 내로 후방으로부터 공급되는 Ar 등의 작동가스를 전기아크가 이온화시켜 전자, 중성자, 양성자로 구성되는 플라즈마를 발생시키는 형으로 pinch effect에 의해 구속 플라즈마 아크로서 고온, 고열의 플라즈마장을 얻는다. 이 플라즈마장의 최고 온도는 수만 °C에 달하며 노즐로부터 초음속의 jet류로 분출된다. 이 플라즈마 jet에 20~100μm의 분말상태로 도입되는 재료(금속, 세라믹스, 시멘트, 고분자)는 용융되어 수백 m/sec의 속도로 모재에 충돌하여 포재상에 편평하게 응고, 적층되는 것이다. 〈그림-12〉는 용사층의



〈그림-11〉 플라즈마 용사건과 플라즈마 생성원리



〈그림-12〉 플라즈마 용사층의 개략적 구조

구조를 도식적으로 설명하고 있으며 〈그림-13〉은 부분안정화 지르코니아(92% ZrO₂, 8% Y₂O₃) 세라믹 분말의 모습과 이를 용사한 코팅층 파단면의 모습을 보여주고 있다. PSZ는 주로 내열성코팅으로서 소위 TBC(Thermal Barrier Coating) 코팅으로 불리며 터빈 블레이드, 엔진 피스톤크라운과 같은 고온화의 요소에 적용되고 있다.

5. 플라즈마 용사의 특징

① 플라즈마 용사에 의해 얻어지는 피막은 입자군의 적층으로 형성되어 있으므로 본질적으로 다공질이 된다. 이의 다공성은 내식성을 목적으로 하는 경우에는 좋지 않지만 응착마모 등에 대해서는 소결 금속과 마찬가지로 함유성을 갖기 때문에 매우 유익하며 적당량의 기공 존재는 열전도율을 낮게 (bulk재의 1/2, 1/3 정도) 하며 내열충격성을 향상시킨다.

② 용사중에 승화나 분해를 일으키는 특수한 재료를 제외한 거의 모든 금속, 시멘트, 세라믹스의 용사가 가능하므로 모재 선택의 폭이 넓다.

③ 모재의 열영향을 작게 할 수 있으므로 변형의 발생이 치명적일 수 있는 부품에의 적용이 가능하다.

④ 피막의 밀착력 및 입자간의 결합력은 용사기의 종류, 용량에 의존되나 일반적으로 밀착의 기구는 기계적인 잇물림 효과에 있다.

⑤ 용사법에 의한 피막형성 속도는 증착법에 의한 것보다 매우 빠르다.

⑥ 용사기로부터 날려진 입자군은 확률계수적 분포로 되기 때문에 용사피막 두께의 균일성은 낮은 편이다.

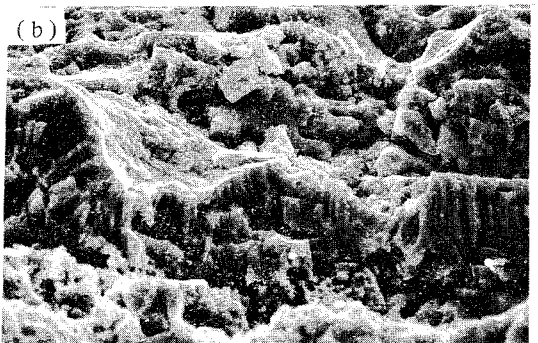
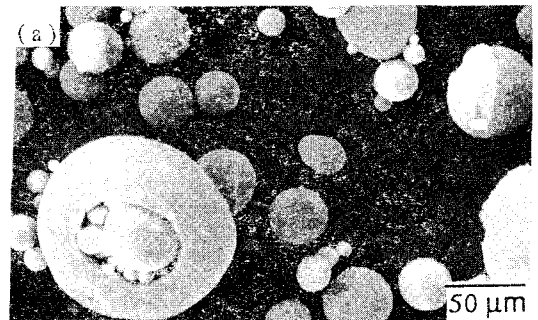
6. 플라즈마 용사법의 적용

플라즈마 용사법은 항공기의 소재코팅으로부터 인쇄공장의 프린팅 롤러와 방직공장의 실안내콘(thread guide)에 이르기까지 매우 광범위하게 응용되고 있다. 그 응용예를 적용대상에 따라 분류하면 다음과 같다.

1) 항공우주산업

가스터빈 엔진

- combustor liner, vane fins



〈그림-13〉 부분안정화 지르코니아(PSZ) 세라믹 분말 (a)과 PSZ 용사층 수직파단면의 전자주사현미경 사진(b)

- 팬 블레이드/압축기 블레이드
- 실 시스템 : 블레이드 실 (blade seals), 라비린스 실 (labyrinth seals)
- forward shaft, outer shroud, seating surface

- 보일러 튜브
- 의료산업의 dental implant, dental bridge, hip joint cap, hip joint, knee joint
- 컴퓨터용 tape heads

2) 자동차 산업 (<그림-14> 참조)

- valve face, 크랭크샤프트, 피스톤크라운, 피스톤링
- alternator cover, synchronisation ring, lambda sonde
- gear shift fork, abradable seal, 연료분사노즐
- 브레이크디스크

3) 기타 산업적용

- 섬유산업의 thread guides, grooved rolls,
- 철강산업의 quenching roll, 압연롤러, 이송롤러
- 산업용 가스 터빈의 블레이드, turbo charger exhaust housing, 증기 터빈의 블레이드와 guide vane

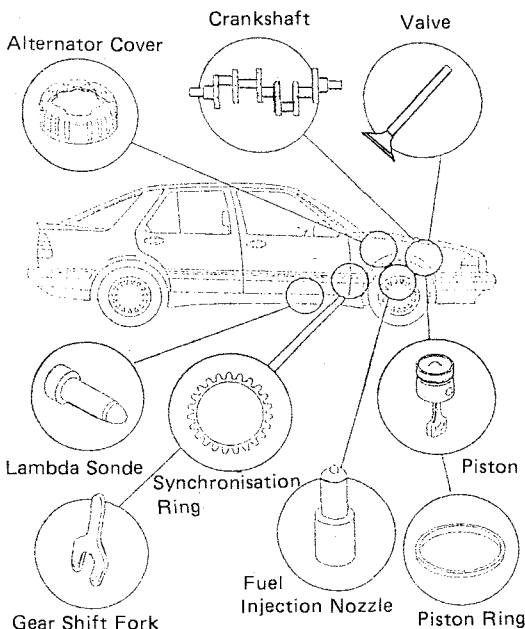
7. 결 론

지금까지 내마모 표면코팅 기술중 플라즈마 용사법을 중심으로 그 특징과 현재의 활용범위에 대해 살펴보았다. 1960년대 영국의 상무성에 제출된 Dr. Peter Jost의 에너지절감 대책에 관한 보고서에 의하면 마찰과 마모를 감소시키고 윤활을 증가시킴으로써 국민총생산의 약 3%가 절감된다고 한다. 이는 이미 20여년전의 통계임을 감안해 볼 때 산업 전반에 걸친 작업조건 고도화에 따라 마찰, 마모, 윤활의 에너지절감에 미치는 영향은 더욱 증가되었을 것이라는 것에 의심의 여지가 없다.

이에 따라 내마모 코팅기술도 또한 그 활용 및 개발의 필요성이 높아지고 있으며 특히 플라즈마 용사기술도 진공하의 저압용용(Low Pressure Plasma Spray)기술 개발과 수중에서의 용사기술 개발 등 계속 연구 및 개발이 진행되고 있다. 그러나 국내에서의 용사기술 적용과 개발은 현재까지는 큰 한계를 드러내고 있다. 이제는 보다 효율적이고 적극적으로 첨단기술의 활용과 개발에 국내의 산업체와 연구진이 일심동체가 되어 선진산업국으로부터의 기술예속에서 탈피하고 그들의 높아만 가는 기술보호장벽을 극복해야 할 것이다.

<참 고 문 헌>

- 1) M. Czichos, *Tribology Int.*, 1974, 8, pp. 14~20.
- 2) D. M. Jones, R. F. Smart and J. A. Reynolds, *Wear*, 1975, 34, pp. 375~382.
- 3) E. Richard Booser, '*Handbook of Lubrication*', 1983, CRC Press.
- 4) M. G. Hocking, V. Vasantasree and P. S. Sidky, *Metallic & Ceramic Coatings, Longman Sci&Tec*, 1989.
- 5) C. M. Kay and J. F. Lindeman, '*Sprayed hard-facings protect high-wear steel processing equipment*', *Iron and Steel Engineer*, May 1989, pp. 32~34.



<그림-14> 플라즈마 용사법의 자동차산업 적용