

## 용사기술의 기본원리 및 응용

김 병 문 · 황 순 영

### Principles and Applications of Thermal Spraying Techniques

Byung Moon Kim and Soon Young Hwang

#### 1. 용사기술의 기본원리

##### 1.1 용사기술

기술혁신의 역사는, 기술에 사용되는 재료개발의 역사이다. 최근 고도의 복잡한 기술은, 여러 가지 기능을 가지는 재료를 필요로 하고 있다. 단일소재로 다양한 기능을 발휘하는 재료를 제작하는 것은 어려운 일이지만, 소재가 가지고 있는 특성을 살리면서 재료표면에 코팅이 가능하다면, 단일소재의 결함을 보완할 수 있으며, 새로운 기능을 부여할 수 있다. 상기의 대응책으로 현재 다양한 표면처리법이 개발되고 있으며, 표면처리법중 하나인 용사법은 산업전반에 걸쳐 폭넓게 이용되고 있다.

용사(Thermal spray, 溶射)란 분말 혹은 선형재료를 가스의 연소 및 방전에 의한 고온열원에 혼합하여 용융입자로 변화시켜, 고속으로 모재에 충돌시켜 급냉 응고하는 기술로, Fig. 1에 용사원리의 개략도를 나타내었다<sup>1)</sup>. 재료의 가열 및 용융을 위하여 에너지 밀도가 높은 연소화염, Arc 및 플라즈마 등의 열원을 필요로 한다. 용사는 성질이 다른 재료를 기재표면에 코팅 하는 기술로 소재의 특성을 살리고 결함을 보완할 수 있으며, 재료기능의 다양화 및 고도화를 가능하게 하는

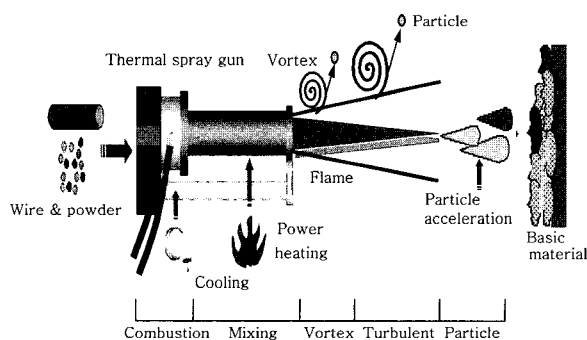


Fig. 1 Diagram of thermal spray coating process

표면처리법이다. 용사를 이용하면 고속으로 두꺼운 코팅이 가능하며 금속, 세라믹, 유리 및 플라스틱 등의 재료를 사용할 수 있다. 그리고, 재료의 종류 및 용사공정의 독자적 특징을 이용하면, 다른 표면처리 방법으로 얻을 수 없는 표면 층을 만들어 낼 수 있다. 제품의 고급화 및 재현성을 위하여 용사법, 시스템, 용사공정, 사용된 재료 및 코팅특성에 대한 이해가 요구된다.

##### 1.2 코팅특성

표면개질법 혹은 표면처리법은 도금 및 용융부착법 등의 습식법, CVD, PVD(진공증착, Sputtering)등의 건조법이 있지만, 용사법은 다음과 같은 특징을 가지고 있다.

- (1) 코팅속도가 빠르고, 두꺼운 코팅이 가능하다 : 코팅 두께의 한계는 입자의 잔류응력과 입자간의 결합력 대소에 의해 결정된다. 입자간의 결합력이 잔류응력을 상회하면 코팅은 파괴된다. 현재, 잔류응력의 대응기술이 발달하여 10mm 이상의 코팅도 가능하다.
- (2) 코팅에 이용되는 재료의 자유도가 크다 : 금속, 합금, 금속간 화합물, 세라믹 및 플라스틱 등의 재료가 이용되며, 표면에 부여되는 특성도 다양하다
- (3) 코팅소재의 종류, 형상 및 치수에 대한 자유도가 넓다 : 금속, 세라믹, 유리, 목재, 플라스틱 및 종이 등의 표면에 코팅이 가능하다. 용사시스템의 이동이 간단하므로 특정부분에도 적용이 가능하지만, 용사 건으로부터 보아 사각이 나타나는 복잡한 형상에 대한 적용은 곤란하다.
- (4) 코팅시 소재변형 및 재질변화가 적다 : 코팅 중 소재의 온도를 제어할 수 있기 때문에 재료의 열변형 산화 및 열분해에 의한 소재변형이 적다
- (5) 복합재료의 코팅이 가능하다 : 복수재료의 동시 혼합분사가 가능하므로, 중첩된 코팅과 조성이 다른

Table 1 Surface improvement method and character

표면처리	코팅물질	기본재료	모재 형상	성형속도 ( $\mu\text{m}/\text{min}$ )	
용사	금속, 세라믹, Cermet	금속, 세라믹, 플라스틱, 목재, 제지	내부코팅은 곤란	0.25 (kg/min)	
도금	금속, 합금	전도성 물질	복잡한 형상	0.02~4.1	
CVD	내열금속, 세라믹, 유기화물	증착온도(500~200 $^{\circ}\text{C}$ )와 증착물질과의 화학부식에 견딜 수 있는 물질	복잡한 형상	0.16~33	
PVD	진공증착	순금속, 합금, 화합물	가스가 포함되지 않은 금속, 유리, 플라스틱	복잡한 형상	0.25~75
	Sputtering	순금속, 합금, 산화물, 탄화물	도체	복잡한 형상은 곤란	0.08~25

코팅이 가능하다.

- (6) 비평형 상태의 조직이 가능하다 : 코팅은 용융입자가 급냉 응고하여 코팅되기 때문에 비정질인 비평위 조성을 얻을 수 있다. 다시 말해, 종래 재료에서 볼 수 없는 성질을 발견할 수 있다.
- (7) 다공질이 형성된다 : 코팅내부에 기공이 존재하며, 다공질을 처리하기 위해 유탄제를 침투시켜 자기 유탄성 코팅을 얻을 수 있으며, 기공과 응력순화에 이용할 수 있다.

### 1.3 용사공정

표면개질법은 일반적으로 (1)코팅의 밀착성을 확보하는 전처리 (2)소재에 코팅하는 용사시공 (3)용사후의 코팅특성을 향상시키는 후처리의 3개의 공정으로 나누어진다. 용사공정은 목적, 이용된 재료 및 방법에 따라 공정의 일부분을 생략할 수 있다. 높은 밀착성의 코팅

을 필요로 하는 경우, 전처리의 영향이 매우 크다. 비행하는 용사입자가 모재표면에 깊게 침투하고, 접촉면적을 크게 하기 위하여, 모재의 표면을 요철형상으로 만들어 표면적을 넓혀야 한다. 또한 모재표면에 부착된 산화물은 알곤, 아세톤, 가성소다 등의 물질을 모재표면에 용제침투, 분무 및 증기 등으로 처리하여 제거하면 모재와의 밀착력을 높일 수 있다. 용사공정에서 주위공기의 유입현상을 줄이고 가스유동을 2차원 유동으로 조절할 필요가 있다. 주위공기의 혼입과 3차원 유동은 미용융 입자의 생성과 코팅내부에 기공이 생기는 원인을 제공하여, 증착된 코팅에 라멜라 구조를 만들어 입자간의 결합력을 약하게 한다. 후처리 공정에서의 열처리는 코팅의 잔류응력 제거와 입자간의 밀착성을 향상시켜 코팅의 강도향상을 얻을 수 있다. 그리고 코팅 표면과 내부로 연결된 기공은 파라핀, 에폭시, 실리콘 등을 이용하여 코팅표면에 발라주면 내식성 및 기계적 특성을 살릴 수 있다.

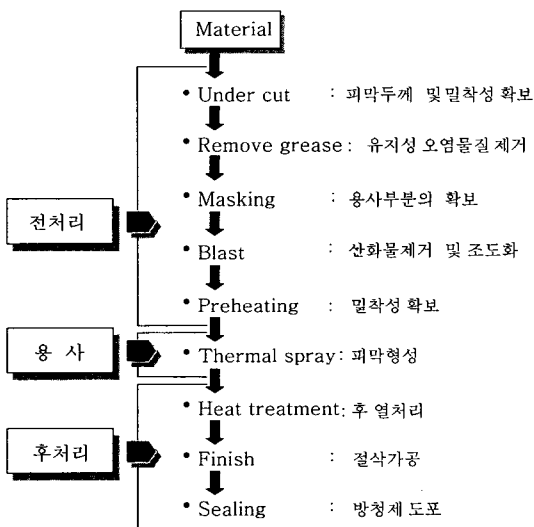


Fig. 2 Thermal spray coating steps

## 2. 용사법의 종류

용사법은 용사재료를 가열하는 열원의 종류에 의해 가스식과 전기식으로 대별할 수 있다. 가스식은, 가연성 가스와 산소의 연소에서 발생하는 고온, 고압의 가스를 대기 중에 고속으로 분출시켜 감압팽창과 체적팽창에 의한 높은 에너지를 얻는 방식이며, 전기식은 방전에너지를 이용하는 것이다. 일반적으로 용사시스템은 Fig. 3에 나타낸 것과 같이 가스공급장치, 용사 건, 입자공급장치, 냉각장치 및 가스 유량조절장치로 구성된다. 용사는 가스를 용사 건 내부의 연소실에 공급되어 혼합한 후, 점화에 의해 폭발이 일어나면, 고온 및 고속의 가스가 노즐 내부로부터 팽창한다. 팽창된 가스화염내에 용사용 분말을 혼입하여 노즐로부터 분사된다.

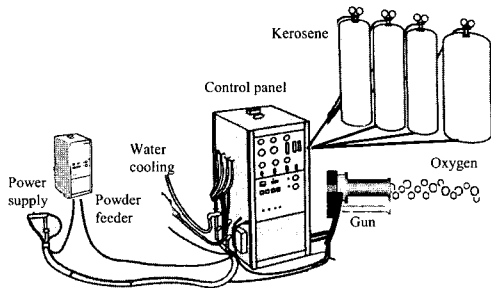


Fig. 3 Diagram of thermal spray coating system (HVOF)

입자의 공급은 용사 건의 내·외부에서 이루어지며, 냉각수는 가스화염에 의해 가열된 노즐주위로 흘러보내 냉각시킨다. 표 2에 용사방법과 특징을 나타내었다<sup>2, 3)</sup>. 최근에 개발한 Cold Spray<sup>4)</sup>는 용사재료의 용점보다 낮은 온도로 가열한 가스를 노즐로부터 초음속으로 분사하도록 설계되어있다. 가스유동내에 용사입자를 투입하면 입자는 가속되어 고체상태로 모재에 충돌하여 소성 변형된 코팅을 이룬다. 가스는 공기, 질소 및 산소를 사용하고, 용사재료는 금속(Cu, Stainless, Ni, Ti), 플라스틱 및 Cermet가 주로 사용된다. 용사입자의 산화 및 열변형이 전혀 일어나지 않고 밀착성이 아주 높은 특징을 가지고 있다. 모재에 부착되지 않은 입

자는 재사용이 가능하지만, 용사거리가 5~300mm로 대형물 혹은 복잡한 형상의 코팅에는 부적합하다.

### 3. 용사현상

용사코팅에서 용사재료의 형상, 입도분포, 직경, 재료의 열전도성, 비열 및 밀도 등의 열적성질, 고온에 의한 연화 및 용융상태, 용사분위기 성분과 화학반응에 의한 변질, 모재의 종류 및 표면온도, 입자충돌과 모재와의 반응 등 복잡한 현상이 동시에 일어난다. 특히, 용사재료의 기열상태, 용사 건에서 모재면에 도달할 때까지 공간에서의 용융입자 비행속도와 분위기의 반응, 모재와의 충돌에 따른 입자의 변형 및 밀착상태, 용사재료간의 결합 등의 물리적 현상은 코팅특성에 많은 영향을 미친다. 이러한 현상은 용사법의 종류, 용사조건에 따라 크게 달라진다. 용사현상에서 발생하는 여러 인자중 입자 및 가스의 특성을 살펴보면 다음과 같다.

#### 3.1 고온·고속가스의 유동

연소 및 방전에 의해 발생하는 가스의 속도와 온도는 상호관계를 가지므로 온도를 알면 대기중에 용사된 입

Table 2 Thermal spray method and characteristic

열 원	용사방법	화염온도 (K)	입자속도 (m/s)	용사원리	용사재료	
연소 가스	Flame용사	용선식	~3300	~200	산소와 아세틸렌의 혼합가스를 열원으로 이용하며, 용사재료에 따라 용선, 용봉, 분말용사로 구분함	금속, 합금
		용봉식	~3300	~200		세라믹, Cermet
		분말식	~3300	~200		금속, 세라믹, 플라스틱
	고속 Flame용사	HVOF, HVOF	~3300	~900	고압의 산소와 탄화수소 등의 가스를 화염원으로 이용하며, 용사 분말이 초고속으로 모재에 충돌	금속, 합금, Cermet
폭 발		~3300	~900	금속, 세라믹, Cermet		
전 기	아크용사	~5500	~250	2개의 금속 와이어 사이에 아크를 발생시켜 와이어를 용융	금속, 합금	
	플라즈마용사 <sup>5)</sup>	대 기	~16000	~450	전극사이에 불활성 가스를 방전하여 플라즈마를 발생하는 용사법으로, 분위기압력에 따라 대기, 감압 및 가압용사로 구분한다.	금속, 합금, 세라믹, Cermet
		감 압	~5000	~700		금속, 합금, 세라믹, Cermet
		가 압	~4000	~300		세라믹, 금속간 화합물
	선폭용사	~5500	~800	콘덴서에 전하를 순간적으로 방전하여 폭발	금속, 합금	
전열폭발 분체용사	~5500	~900	고전압 및 방전류를 이용	전도성 세라믹, 금속		
레이저	레이저 용사		~250	레이저를 용사의 열원으로 사용	금속, 합금, 세라믹, Cermet	
기 타	Cold Spray 용사	~500	~1200	용사재료의 용융온도 보다 낮은 가스를 초음속으로 분사	금속, 플라스틱, Cermet	

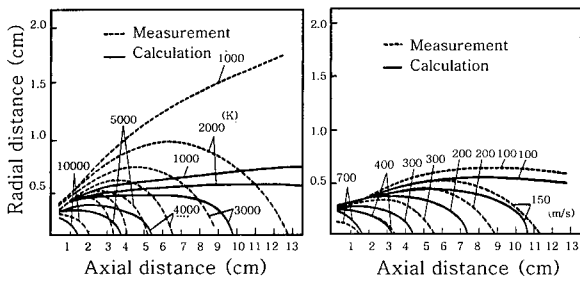


Fig. 4 Temperature and velocity distribution of plasma jet

자의 평균속도는, 기체방정식으로부터 단위시간당에 공급된 가스의 체적을 계산하여 용사노즐의 단면적을 빼면 노즐 출구로부터 분사된 가스의 속도를 알 수 있다. Fig. 4에 플라즈마 제트의 온도 및 속도분포를 나타내었다. 반경방향의 온도분포는 급격한 온도구배를 가지고 있으며, 축방향의 온도 및 속도는 주위공기가 다량으로 혼입되기 때문에 급격히 감속하는 현상을 나타내고 있다. 일반적으로 이러한 경향은 용사조건에 관계없이 원형노즐의 분사특성에 지배받기 때문이다<sup>6)</sup>.

### 3.2 용융입자의 가속 및 가열속도

양호한 코팅을 위하여 기본적으로 입자의 용융온도가 일정하게 유지되어야 하며 치밀한 코팅이 되도록 입자가 충분히 가속되어 모재와 충돌하여야 한다. 분말용사의 가속과 가열은 동시에 진행되며, 입자의 가속은 가스의 체적팽창과 비례하지만, 가속에 따른 화염내의 잔류시간이 짧아서 미용융 상태로 모재와 충돌하며, 비행궤적이 가스유동에 따라가는 경향이 생긴다. 용융입자의 속도변화는 다음과 같은 방정식으로 예측이 가능하다. 여기서,  $U$ 는 속도,  $\rho$ 는 밀도,  $C_p$ 는 입자와 가스,  $C_b$ 는 항력계수이다. 수치계산에서 점성에 기인하는 항력계수는  $Re$ 수에 달라짐을 고려해야한다.

$$dU_p/dt = \frac{3}{4} \frac{\rho_g C_D}{\rho_p D} (U_g - U_p)$$

Fig. 5는 입자경에 따른 노즐축 중심의 속도변화를 나타내 것으로<sup>7)</sup> 3  $\mu$ m 입자는 노즐 내에서 가스와의 혼합이 충분히 이루어져 분출하기 때문에 급격한 속도 감속이 일어난다. 하지만, 입경이 클수록 노즐 선단에서부터 속도가 점차적으로 증가하고 있다. 이러한 이유는 입경이 작은 경우와는 반대로 노즐 내에서 가스와의 충분한 혼합이 이루어지지 않아서 노즐선단에서부터 계속적으로 가스의 운동량이 입자에 전달되어 입자의 운동량이 커지기 때문에 입자의 속도성분이 증가하고 있다.

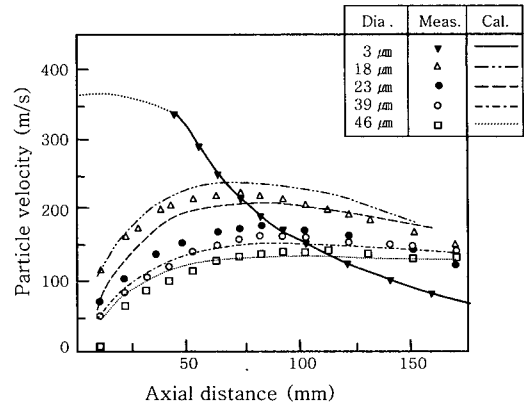


Fig. 5 Velocity distribution along jet centerline at different molten particle sizes

입자의 가열온도는 입자내부의 열전도율이 충분히 크다고 가정하여 입자내부의 온도분포를 무시하면, 다음과 같은 방정식을 구할 수 있다. 온도는  $T$ ,  $C_p$ 는 용사 입자의 비열,  $\lambda_p$ 는 가스의 열전도율,  $r$ 은 입자의 반경이다.

$$\frac{dT}{dt} = -\frac{1}{\rho_p C_p r^2} \frac{d}{dt} \left( r^2 \lambda_p \frac{dT}{dr} \right)$$

Fig. 6은 플라즈마 용사를 이용한 알루미늄 입자의 노즐 축 중심에서의 표면온도 분포를 측정치와 계산치를 비교한 것이다<sup>8)</sup>. 입경이 작을수록 가열과 냉각이 쉽게 일어나며, 입경이 클수록 가열시간이 길어진다. 특히, 열전도율이 나쁜 세라믹입자는 표면이 용융되어도 입자의 중심부는 고체상태로 모재와 충돌하므로 입경 및 분포를 고려하여야 한다.

### 3.3 용융입자의 충돌·변형

용사입자는 충돌전에 용융상태가 되면, 액적은 충돌과 함께 변형하여 응고한다. 입자가 모재표면에 충돌하여 변형하는 시간은 근사적으로 입자의 직경에 속도를

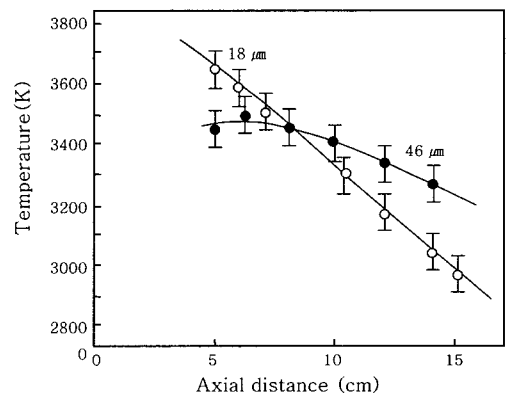


Fig. 6 Temperature distribution along jet centerline at different molten particle sizes by plasma spraying

나는 값으로 구할 수 있다. 즉, 50 $\mu$ m의 입자가 200 %로 속도를 가졌다면 변형에 필요로 하는 시간은 0.25  $\mu$ s가 된다. 변형현상은 응고현상과 비교하여 매우 고속이므로, 변형과정과 응고과정은 독립적으로 취급하는 것이 가능하다<sup>9)</sup>. 용융입자는 충돌직전 운동에너지가 충돌 후, 입자의 내부유동을 일으켜 점성상태 에너지가 산란한다고 가정함으로써 충돌후의 입자직경을 구할 수 있다. 이때, 표면의 에너지증가 및 응고는 무시한다. 충돌전의 입자반경을  $r_o$ , 충돌후의 편평화한 원반의 직경을  $R_o$ , 입자속도를  $U_p$ 로 하면 근사식은 다음과 같다. 하기의 방정식에서 충돌속도는 직경에 큰 영향을 미치지 못함을 알 수 있다<sup>10)</sup>.

$$R_o / r_o = 1.48 (\rho_p U_p r_o / \mu_p)^2$$

### 3.4 용사코팅의 형성

용사에 의한 코팅특성을 살펴보면, 모재면을 향하여 비행하는 입자는 용융상태이며, 그 표면은 산화막으로 덮여있다. 입자는 모재면 혹은 미리 형성된 코팅표면에 충돌하여, 급속으로 넓게 퍼지면서 결합하고 용융입자가 계속해서 중첩된다. 형성된 코팅은 Fig. 7에서 나타난 것과 같이 일반적으로 용융입자에 포함된 기공, 입자표면과 기공의 내면에 존재하는 산화물, 입자와 입자 사이에 존재하는 공동현상, 입자궤적에 따른 미용융입자, 입자중심에 발생한 미용융의 고체 핵이 존재한다<sup>11)</sup>.

입자에 포함된 기공 및 산화물은 코팅표면의 균열 및 소재와의 밀착상태를 나쁘게 하는 원인이 된다. 이러한 원인은 용사조건의 부적절, 용융입자의 수밀도 분포 및 비행시간, 난류 제트류, 공급된 기체와 입자의 중량비, 입자의 충돌 각, 변형과정, 피복내의 잔류응력, 주위환경과 입자와의 반응, 용융 입자내의 가스의 확산, 기재 표면의 조도화 처리부족 및 표면산화물의 미세거 등의 영향으로 발생한다. 코팅의 일반적인 특징은 다음과 같다.

- (1) 코팅은 일반적으로 원반상의 용융입자가 연결된 라멜라구조이지만, 실제 고온의 용융입자가 비행중에

부분적으로 산화현상이 발생하고, 주위기체가 혼입되고, 용융입자가 저온의 모재와 충돌할 때 급속 냉각되어 충분한 화학적 결합이 이루어지지 않기 때문에 입자간의 결합이 완전하지 못하다. 입자간의 결합 및 응고는 위, 아래 및 옆으로 진행되며, 진행시간 및 온도차가 다르기 때문에 라멜라 구조는 상하로 존재하며, 내부응력이 발생하여 라멜라 층 간의 미끄럼 현상이 발생하여 균열이 일어난다

- (2) 고온 용융상태의 입자는 화학적 변화에 의해 조성이 변화된다. 탄소강의 탈탄, 탄화물 세라믹의 탈탄소 및 산화, WC-Co의 W<sub>2</sub>C 및 Co<sub>3</sub>W<sub>3</sub>C로의 변화가 생긴다.
- (3) 용융상태의 입자는 모재표면에서 급속응고가 일어난다. 금속재료의 응고속도는 100 만 $^{\circ}$ C/s ~1 억  $^{\circ}$ C/s이며, 세라믹은 10 만 $^{\circ}$ C/s ~100 만 $^{\circ}$ C/s이다. 이와 같이 급냉에 의해 고온상태의 동결현상이 일어나면 조직은 비평형 상태가 된다.
- (4) 용융입자는 충돌 후, 라멜라 구조에 의해 자유롭게 수축이 일어나지 않도록 구속되므로 입자의 내부에는 잔류응력이 발생한다. 일반적으로 입자간의 구속은 적지만 선형구조간의 구속에는 잔류응력이 더 큰 값으로 나타난다. 대부분의 경우 코팅의 두께를 수십  $\mu$ m의 코팅을 한번으로 형성하지만, 한번의 코팅에도 잔류응력이 발생한다. 따라서, 용사코팅의 두께를 1mm 이상으로 할 경우 세심한 주위를 기울여야 한다. 또한, 모재와 용사재료의 열팽창계수에 따른 잔류응력이 발생한다. 이러한 이유로 본드코팅이 사용된다.

## 4. 용사재료

용사재료는 용사방법의 개발에 따라 다양한 재료가 개발되었으며, 최근에는 복합 용사재료 개발에 많은 연구가 진행되고 있다. 용사재료로서, 순금속과 합금금속, 산화물과 탄화물, 질화물 등의 세라믹계, 금속간 화합물계, 플라스틱계로 나누어지며, 재료의 형태는 용사법에 따라 와이어, 분말, 액체로 구분되어 있다. 분말의 경우 용융시간을 고려하여 입경을 일반적으로 수  $\mu$ m~100 $\mu$ m정도로 하고 있다. 표 3에 용사재료의 물리적인 특성을 나타내었다.

### 4.1 금속계 재료<sup>12)</sup>

열전도율이 뛰어나고 재료 중심부의 용융시간이 매우 빠른 특징을 가지고 있으며, 금속 및 세라믹 표면을 강화하기 위한 결합 층 코팅과 모재의 내식, 내마모, 내

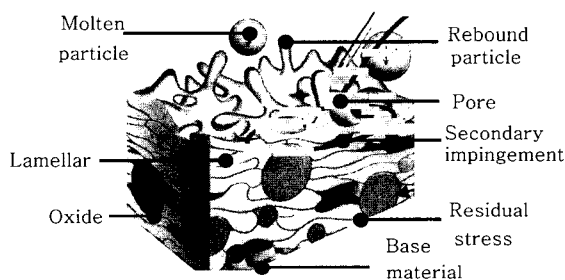


Fig. 7 Structure of coating layer

Table 3 Physical properties of thermal spray materials

용사재료	밀도 (g/cm <sup>3</sup> )	융점 (°C)	열전도율 (cal/cm·s·K)	전기저항률 (Ω·cm)	열팽창률 (K <sup>-1</sup> ×10 <sup>6</sup> )
Al	2.70	660	0.57	2.50×10 <sup>-6</sup>	23.2
Cu	8.85	1083	0.95	1.67×10 <sup>-6</sup>	16.5
Fe	7.87	1535	0.19	9.71×10 <sup>-6</sup>	11.8
Ti	4.50	1683	0.05	43.2×10 <sup>-6</sup>	8.6
Mo	10.28	2620	0.33	5.0×10 <sup>-6</sup>	4.8
W	18.70	3410	0.42	5.0×10 <sup>-6</sup>	4.5
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.0	2049	0.06		5.4
ZrO <sub>2</sub>	5.9	2677	0.007		10.5
TiN	4.08	2932	0.068		6.3
SiC	3.10	2700	0.019	1.0×10 <sup>-4~6</sup>	3.1
TiC	4.94	3250	0.085	61×10 <sup>-6</sup>	6.4
WC	15.10	2720	0.144	19.2×10 <sup>-6</sup>	3.7
ZrB <sub>2</sub>	6.09	3200	0.167	9.7×10 <sup>-6</sup>	5.9
MoS <sub>2</sub>	6.24	2020	0.116	21.6×10 <sup>-6</sup>	8.25

열 및 내고온 산화성 등의 향상을 위한 기능성 코팅에 사용된다. 강재의 부식방지용으로 알루미늄, 아연 및 알루미늄-아연 합금이 주로 사용된다. 알루미늄과 동은 전도성 코팅재료로 사용되며, Ni-Cr합금은 내식성에 우수하여 고온에서 내산화성인 고강도 재료로 사용되고, MCrAl합금은 내식성 및 내고온 산화성에 사용된다. Ni-Al합금은 용융시 다량의 열을 방출하여 모재표면을 가열하기 때문에 밀착성이 양호한 코팅을 얻을 수 있으며, Mo, W등의 고융점 금속은 고온재료 및 내마모 재료로 사용된다.

#### 4.2 세라믹계 재료<sup>13)</sup>

열전도율이 금속에 비해 낮고, 일반적으로 온도 및 약품에 대해 매우 안정적이고, 경도가 높기 때문에 고온 및 내마모성을 요구하는 표면처리에 사용된다. 산화물 재료로서 자주 사용되는 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>는 열전도율이 가장 높은 특성을 가지고 있으며, 금속재료에 비해 양호한 밀착성을 가지기 때문에 내마모성이 우수하지만 충격에는 약하다. 하지만, TiO<sub>2</sub>를 첨가하면 코팅의 기공률이 감소하고 치밀한 코팅을 얻을 수 있다. ZrO<sub>2</sub>는 열전도율이 작고 열팽창률계수가 금속에 가깝지만 온도에 의해 결정계 변화와 밀도변화가 동시에 일어나 코팅표면에 균열을 일으킨다. 텅스텐, 티타늄 및 크롬 등의 탄

화물은 고경도의 특성을 가지고 있으며, 처음 산소와의 반응에 비교적 낮은 온도를 가진다.

#### 4.3 Cermets계 재료<sup>14,15)</sup>

탄화물(TiC, ZrC, B<sub>4</sub>C, WC), 산화물(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ZrO<sub>2</sub>, ThO<sub>2</sub>)등의 고융점 세라믹과 Fe, Mo, Ni, Co 및 Cr등의 금속을 소결복합한 재료로서 기계적 성질이 우수하여 절삭공구, 내열용 부품의 코팅에 사용되며, 부식환경에는 내식성이 우수한 Ni, NiCr 및 CoCr 등을 첨가하여 사용한다. 일반적으로, 혼합비 및 세라믹 분말의 입경이 코팅특성에 많은 영향을 미친다. WC-Co계는 500°C이하에서 변형이 일어나지 않지만, 500°C이상에서는 W<sub>2</sub>C 및 Co<sub>3</sub>W<sub>3</sub>C로 변형이 일어나는 특성을 가지고 있으므로 저온·고속 용사법이 필요하다. Cr<sub>2</sub>C<sub>2</sub>계는 약 820°C의 고온에도 내마모성이 우수하지만, 코팅의 미세구조가 불균일하고 산화반응을 일으키는 결점을 가지고 있다. MoB-Ni계는 고온의 환경에 사용에 적합하며, MoB표면에 Ni를 진공상태에서 코팅하여 사용한다.

#### 4.4 플라스틱계 재료

플라스틱 재료는 내약품성과 내구성이 좋은 방식성

코팅을 얻을 수 있다. 또한 용제를 사용하지 않고 코팅을 할 수 있기 때문에 대형 형상물의 코팅이 가능하지만, 용사에 적합한 재료의 제약이 많다. 용사공정에서 용융온도와 분해온도가 달라야 하며, 공기와의 반응으로 완전용융이 일어나지 않아야 하며, 점성이 낮아야 한다. 또한 모재를 재료의 용점온도까지 예열하는 공정이 반드시 필요하다<sup>16)</sup>. 재료에는 용사시 가열에 의해 내교가 연화하여 코팅 층을 형성하는 가경화성 수지(폴리에틸렌, EVA, 나일론)와 가열에 의해 연화와 동시에 분자간의 결합을 강화하는 열경화성 수지(에폭시)가 있다.

5. 용사코팅의 On-line process control system

고부가가치 용사코팅의 산업적 활동의 증대에 따른 제품의 고급화 및 신뢰성 확보는, 용사코팅 공정 및 특성평가가 일원화된 On-line process control system으로 가능하다. 용사코팅 공정에서, 코팅제품의 불량발생은 기업의 대량손실과 직결된다. 일반적으로, 산업현장에 있어서 코팅의 공정에 따른 코팅특성 데이터가 전무한 상태에서, 숙련공의 경험에 의존하여 코팅이 이루어지고 있기 때문에 코팅의 밀착력 불량, 잔류응력에 의한 박리, 기공침투에 의한 부식 등이 발생하여 기기의 수명단축에 따른 비용증대를 초래하고 있다. 이러한 문제점을 해결을 위해 화염의 유동특성, 용융입자의 비행시간, 입자와 Vortex관계, 용융입자의 충돌 각, 변형과정, 피복내의 잔류응력, 용융 입자내의 가스의 확산, 표면 산화물의 제거방법, 모재의 냉각 등의 부분연구와, 상호관계 규명에 대한 연구가 진행되고 있지만, 지금까지 보다 정량적이고 정성적인 정보가 부족한 실정이다. 따라서 제품의 신뢰성, 재현성 및 생산효율 증가를 위

한 용사코팅의 고도화 기술개발을 위해 재료학, 열역학, 유체역학 및 제조공학을 연관시킨 용사코팅 프로세스 및 특성평가 기술개발이 필요하다. 아울러 계측시스템, 용사시스템 및 재료분석 정보를 하나로 연결하는 On-line process control system을 구축 할 경우, 소재간의 장점을 적절히 조합할 수 있고, 기존재료의 활용도를 극대화 할 수 있기 때문에 표면처리와 관련된 산업전반에 확대 적용 할 수 있다고 사려된다. On-line process control기술은, 기존의 코팅보다 내마모성과 인성이 동시에 향상되어 산업설비의 수명연장 및 원가절감에 획기적으로 기여할 수 있는 초미립의 분말(Nano powder)을 보다 효율적으로 이용할 수 있다<sup>17)</sup>. 또한, 기존의 Cr 도금영역을 교체 할 수 있으며, 아연 및 용융 알루미늄도금의 품질개선이 가능하고, 용사코팅의 신뢰성 향상으로 비용절감과 환경오염 방지에 효과를 얻을 수 있다.

6. 응용분야

용사코팅은 각종 건축물, 기계장치, 기구 등의 부재, 부품의 표면에 모재보다 고도의 성능 혹은 모재의 기능을 나타낼 수 있는 역할을 부여하는 것을 목적으로 한다. 즉, 부재 및 부품의 내식성, 내마찰성, 내열성, 단열성 등의 성질을 향상시킬 수 있다. 그리고 표면의 전도성, 전기절연성, 열 방사성, 이온 전도성 등 모재가 가지고 있지 않는 기능을 부여할 수 있다. 용사코팅 층의 효과는 단일성능을 향상시키는 것 뿐 만 아니라, 결과적으로 복합적인 특성을 부여함으로써 모재의 성능향상을 동시에 만족시키는 것이다. 용사코팅의 응용은 용사법의 특징을 기술적으로, 경제적으로 검토한 후, 적

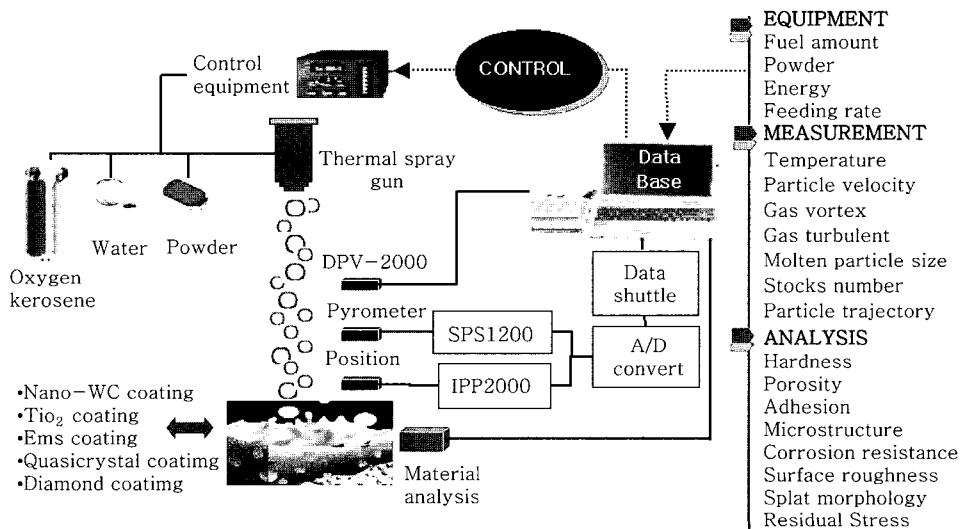


Fig. 8 On-line process control system for thermal spray coatings

**Table 4** Application of thermal spray coating<sup>18)</sup>

사용분야	용사목적·용도	관련부품
자동차	•내마모·내열	캠 샤프터, 펌프, 디스크 블레이드, 피스톤, 실린더, 클러치판, 터보 컴프레서, 산소센서, 피스톤 링, 밸브 리프트, 브레이크 캠, 크랭크 축
항공	•내열·내식·내마모 •엔진효율증대	로켓트 노즐, 케이싱, 터빈 블레이드, 압축기, 동체표면, 베인, 연소실, 컴프레서 블레이드, 팬 블레이드
전기	•내열·내식	콘센트, 통신 안테나
시멘트	•내열·내식·내마모	송풍기 블레이드, 축, 컨베어
화학	•내열·내마모	회전차 및 펌프 축, 화학펌프의 케이싱, 링, 슬리프
금속	•내열·내식·내마모	연속주조의 주형, 각종 롤, 송풍기 부품, 성형금형
동력	•내마모·내열·내식	석탄 송급용 스크루, 배기용 송풍기, 증기 밸브, 컨베어, 터빈 기화기, 각종 축, 롤, 기어표면
일반	•내마모·부착·내열·내식	각종 게이지, 선반센터, 압출기 스크루, 연삭기 부품, 엔드밀, 드릴, 스피커 진동판, 복사기 롤, 인공 뼈
섬유	•내마모·내식	스핀들, Thread 가이드 외 소형 롤

절한 용사법을 선택하고 용사재료, 용사조건 및 시공법을 충분히 숙지한 후, 적용하여야 한다.

**참고 문헌**

1. P. Lech : The Science and Engineering of Thermal Spray Coating, John Wiley & Sons, 1995, 28-50
2. 佐々木 光正 : 사회사의 21세기를 향하여 기대하는 용사기 재료, 용사기술, 20-1(2000), 20-29 (in Japanese)

3. 일본용사협회편 : 용사기술 핸드북, 용사기술협회, 2002, 129-151 (in Japanese)
4. P. Richter, Amplifing/D. W. Krommer and P. Heinrich : Equipment Engineering and Process Control of Cold Spraying, International Thermal Spray, Tagungsband Conference Proceedings (2002), 375-379
5. Robert B. Heimann : Plasma Spray Coating, VCH(1996), 17-25
6. J. Mckelliget and J. Szekely : Plasma Chem. and Plasma Process., 2(1982), 317
7. P. Fauchais : 31st Canadian Chemical Engineering Congress, 1983
8. P. Fauchais : Int. Summer School on Plasma Chemistry, (1987), 546-550
9. R. Ghafouri-Azar, J. Mostaghimi and S. Chandra : Deposition Model of Thermal Spray Coatings, International Thermal Spray Conference 2001, (2001), 951-958 (in Singapore)
10. J. Madejski : J. Heat Mass Tansfer., 19(1976), 1009
11. E. Kretzschmar : Mell Keramik and Plastspritzen, Veb Verlag Technik, Berlin, 1969
12. K. Hidaka : Metallic Powder for Thermal Spraying, 34-4 (2001), 223-229 (in Japanese)
13. 荒田 : 세라믹용사와 응용, 일간공업신문사, 1986, 19 (in Japanese)
14. 金田 丈夫 : 기능성 코팅, 일간공업신문사, 1986, 259-277 (in Japanese)
15. T. Itsukaichi : Cermet Materials for Thermal Spray and High Velocity Flame Spraying, Thermal Spray, 38-4(2001), 235-241 (in Japanese)
16. 安井 敏之 : 용사기술, 일본용사협회, 9-4(1990), 85 (in Japanese)
17. C. C. Nerndt and E. J. Lavenia : Thermal Spray Processing of Nanoscale Materials-A Conference Report with Extended Abstracts, Journal of Thermal Spray Technology, 7-3(1998), 411-439
18. 連井 淳: 신판용사공학, 산보출판, 1997, 209-258 (in Japanese)



- 김병문(金丙文)
- 1960년생
- 포항산업과학연구원
- 용사, 시스템설계, 계측
- e-mail: bmkim@rist.re.kr



- 황순영(黃順榮)
- 1957년생
- 포항산업과학연구원
- 용사, 부식
- e-mail: syhwang@rist.re.kr