

## Spraying 기술 (Ⅲ)

김형준

### Spraying Technology (Ⅲ)

Hyung-Jun Kim

본 강좌에서는 spraying 기술 강좌의 마지막으로서 최근 1~2년 사이에 비로서 장비 상용화에 성공하여 제품 적용 연구가 미국과 독일을 중심으로 한 선진국에서 활발하게 진행중인 소위 '저온 스프레이' 기술을 논의하고 본 spraying 기술강좌를 마치고자 한다.

#### 1. 저온 스프레이 기술<sup>1,2)</sup>

저온 스프레이 코팅기술은 'cold gas-dynamic spraying (CGDS)', 'high-velocity non-combustion spraying', 또는 간단히 'cold spray' 처럼 다양한 이름으로 알려졌으며, 1980년대 중반에 시베리아의 The Institute of Theoretical and Applied Mechanics of Russian Academy of Science에서 최초로 현상을 발견하였다. 이 공정은 1994년 러시아 발명가들에 의하여 미국특허권이 발표되었다<sup>3)</sup>.

일명 cold spray라 일컬어지는 코팅공정은 보통 1~50  $\mu\text{m}$ 의 입도를 가진 금속이나 복합재료 분말을 압축가스 (He, N<sub>2</sub>, 공기, 혹은 혼합 가스)의 초음속 제트로 가속시키면, 분말 소재의 소성변형과 결합을 줄만한 충분한 속도 (보통 300~1300 m/sec), 즉 임계속도에 이르게 되어 코팅이 형성된다. 임계속도는 코팅분말과 기판 소재에 따라 변하게 된다. 최근에는 유사하게 kinetic spray라고 주장하는 유사한 기술을 통하여 1~200  $\mu\text{m}$ 까지의 입도 분말도 이러한 기술로 가능하다고 보고되고 있다<sup>4)</sup>. 코팅 형성기구는 일반적으로 고속의 충돌이 분말의 얇은 금속산화막을 파괴하여 순간적으로 높은 압력과 온도에 의해 원자간 결합을 형성하는 것으로 알려져 있다. 이때 압축가스의 온도를 가열하면 (보통 최대 700°C까지) 충돌입자의 부착율을 증가시킬 수 있게 된다.

Fig. 1은 cold spray의 기본 개념에 관한 초기 러시아의 연구결과를 보이고 있다. Fig. 1은 상온에서 알루미늄,

구리, 그리고 니켈과 같은 여러 금속 분말들의 입자속도에 대한 부착효과 의존성을 보여준다. 즉, 부착효과의 두 가지 특징적인 범주는 임계속도 ( $V^*$ )에 의해 구별되어진다. 첫번째 범주인 임계속도 이하에서는 기지 마모의 잘 알려진 공정과 일치한다. 그러나, 임계값  $V^*$  이상으로 입자속도가 꾸준히 증가함으로써 이 코팅공정은 시작된다. 입자속도가 임계속도에 다다를 때 부착효과는 50~70%로 빠르게 증가한다. 알루미늄, 구리, 그리고 니켈과 같은 다양한 금속의  $V^*$ 에 대한 전형적인 값은 Fig. 1에서 500~700 m/s의 범위에 있다. 다양한 금속과 합금은 거의 가열없이 충분한 입자속도만 충족시켜 준다면 상온에서조차 코팅될 수 있다.

최근의 실험실적 연구에 기초한 코팅소재에 대한 임계속도식이 다음과 같이 보고되고 있다<sup>5)</sup>. 즉,

$$V^* = 667 - 14\rho + 0.08T_m + 0.1\sigma_u - 0.4T_p$$

여기서  $\rho$ 는 코팅소재의 밀도 ( $\text{g/cm}^3$ ),  $T_m$ 은 코팅소재의 용점 ( $^\circ\text{C}$ ),  $\sigma_u$ 는 코팅소재의 인장강도 (MPa), 그리고  $T_p$ 는 코팅소재의 입자 온도 ( $^\circ\text{C}$ )이다. 즉, 코팅소재의 임계속도는 입자밀도와 초기 입자온도가 증가할수록 감소하지만, 용점과 강도가 증가할수록 임계속도는 증가한다는 점을 시사한다.

Cold spray 공정시 입자속도를 증가시키기 위하여 가스 속도를 증가시키기 위한 방편으로 가스를 가열하고, 질소보다는 헬륨을 사용하는 이유는 다음에서 설명된다. 가스 동역학 모델에 기초를 두고 있는 노즐의 목부분 지역에서의 가스 속도 ( $V$ )는 다음에 나오는 관계식에 의해 가스 특성이 관련된다.

$$V = (\gamma RT/M_w)^{1/2}$$

여기서  $\gamma$ 는 ratio of specific heat를 나타낸다 (일반적으로 공기는 1.4, 헬륨은 1.66이다). R은 특정한 가스 상수이고, T는 가스 온도이다. 그리고,  $M_w$ 는 가스의 분자량이다. 그러므로, 방정식은 조금 더 높은 비열과 조금 더 낮은 분자량을 가지고 있는 헬륨이 공기보다 대단히 더 높은 기체 속도들을 제공할 것으로 기대된다. 방정식은 또한 V와 T는 정비례한다는 것을 보여준다. T가 주어진 기체에 초기 기체 온도까지 직접적으로 비례하기 때문에, 입자속도는 초기 기체 온도에 일차원적으로 증가할 것이다.

Fig. 2는 cold spray 시스템의 개요를 보여주고 있다. 높은 압력에서 추진가스나 혹은 압축상태에 있는 공기는 가스히터와 분말을 송급하는 용기를 포함하는 여러 시스템으로 가스통제 측정장치를 통해 넣어진다. Thermal spray 방식과는 반대로 고압으로 유지된 가스는 전기적으로 가열된다. 높은 압력의 가스는 노즐입구를 통해서 압축된 de Laval 형태의 노즐로 넣어진다. 그 결과로서 아주 작은 대기압력으로의 팽창이 생기게 된다. 이 결과로서 초음속의 유출이 생긴다. 분말은 노즐의 고압축에서 넣어지고 정확한 측정기구에 의해 전달된다. 밀폐된 공간이라면 코팅 처리되지 않은 입자들과 가스는 순환을 통하여 재사용이 가능하다.

#### 4. 저온 스프레이 기술의 장점

Cold spray 기술의 장점은 다음과 같이 정리될 수 있다.

- (1) 산화와 바람직하지 않은 상을 피할 수 있다.
  - 낮은 oxide content를 지닌다.
  - Thermally sensitive한 소재 (Ti, Cu, etc) 코팅이 가능하다.
- (2) 최초 입자 재료의 고유 물성 유지가 가능하다.
  - Nano, amorphous, intermetallic 재료의 코팅 및 near net shape 형성이 가능하다.
- (3) 낮은 잔류응력을 유도한다.
  - 응고 응력이 존재하지 않으므로 thick coating이 가능하다 (up to 20 mm).
  - Near net shape fabrication 공정으로 유망하다.
- (4) Bulk 소재에 비하여 높은 열 및 전기전도도를 지닌다.
- (5) 높은 밀도, 높은 경도, 냉간가공 미세조직을 제공한다.
- (6) Ultra-pure coating이 가능하다.
- (7) Good surface finish를 지닌다.
- (8) 입자크기가 5~10  $\mu\text{m}$ 보다 작은 분말 사용이 가능

하다 (1~50  $\mu\text{m}$ ).

- (9) Highly dissimilar 재료 코팅이 가능하다.
  - Layer by layer 코팅이 가능하다.
- (10) Short standoff distance (5-35 mm)를 사용한다.
  - Minimal substrate preparation (masking)을 요구한다.
  - 파이프 내경 코팅에 적당하다.
- (11) Small spray beam (~5 mm in diameter)을 사용한다.
  - 정밀 부품 (Precise control, width up to 1 mm)에 적당하다.
- (12) 높은 생산성이 가능하다 (up to 15 kg/hr).
- (13) High deposition rate and efficiency (up to 95%)
- (14) 분말 재사용이 가능하다. (up to 100%)
- (15) 기판 예열을 최소화 한다.
- (16) 작업 안전성 향상과 소음 감소가 이루어진다.
  - 고온 가스 제트, radiation, 폭발 가스 사용이 없다.

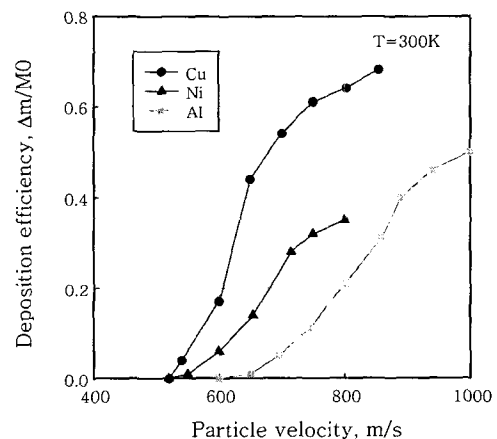


Fig. 1 Deposition efficiency as a function of particle velocity for three typical metal powders at ambient jet temperature<sup>1)</sup>

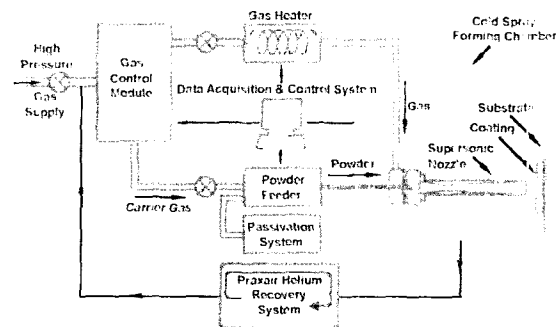


Fig. 2 Schematic representation of cold spray system

## 참 고 문 헌

1. 김형준, 이창희, 권영각, *Cold spray 기술*, 대한용접학회지, **20** (2002), No. 4, 53~60.
2. A. Papyrin, *Cold spray technology*, Advanced Materials & Processes, **159** (2001), 49~51.
3. A.P. Alkhimov, A.N. Papyrin, V.F. Kosarev, N.I. Nesterovich, and M.M. Shushpanov : *Gas-dynamic spraying method for applying a coating*, US Patent 5,302,414, April, 1994.
4. T. Van Steenkiste and J.R. Smith, Evaluation of coatings produced via kinetic and cold spray processes, in *Thermal Spray 2003*, Edited by B.R. Marple and C. Moreau, 5~8 May 2003, Orlando, FL, USA, p.53~61.
5. F. Gartner, C. Borchers, T. Stoltenhoff, H. Kreye, and H. Assadi, Numerical and microstructural investigations of the bonding mechanisms in cold spraying, in *Thermal Spray 2003*, Edited by B.R. Marple and C. Moreau, 5~8 May 2003, Orlando, FL, USA, p.1~8.



- 김형준 (金亨駿)
- 1960년생
- 포항산업과학연구원
- 용사코팅, 육성용접, 표면개질
- e-mail: khyungi@rist.re.kr