특 집 : 용사기술

Cold Spray 기술

김 형 준 · 이 창 희 · 권 영 각

Cold Gas Dynamic Spraying Process

Hyung-Jun Kim, Chang-Hee Lee and Young-Gak Kweon

1. 기술개요

일명 cold spray라 일컬어지는 코팅공정은 보통 1~50 ㎛의 입도를 가진 금속이나 복합재료 분말을 압축가스 (He, N_2, 공기, 혹은 혼합 가스)의 초음속 제트로 가속시키면, 분말소재의 소성변형과 결합을 줄만한 충분한 속도 (보통 300~1300 m/sec), 즉 임계속도에 이르게 되어 코팅이 형성된다. 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 600℃까지) 충돌입자의 부착율을 증가시킬 수 있게 된다[1-5].

Fig. 1은 cold spray의 기본 개념에 관한 초기 러시아의 연구결과를 보이고 있다[1]. Fig. 1은 주변의 정체한 제트기류의 상온 아래서 알루미늄, 구리, 그리고 니켈과 같은 여러 금속 분말들의 입자속도에 대한 부착효과 의존성을 보여준다. 이 연구의 주요한 결과는 다음과 같다. 부착효과의 두 가지 특징적인 범주는 임계속도 (V•)에 의해 구별되어진다. 첫번째 범주 (V 〈V•)는 지금 이 경우에선 바람직하지 않지만 기지 마모의 잘 알려진 공장과 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 금속에 V•에 대한 전형적인 값은 그림 1에서 500~700 m/s의 범위에 있다. 다양한 금속과 합금은 거의 가열없이 충분한 입자속도만 충족시켜 준다면 상온에서 조차 코팅될 수 있다. 기질의 침식에서 차가운 고체 입자들의 유속에 의한 실행 가능한 코팅으로의 변화는 cold spray 금속 개발에 대한 물리학적인 기초이다.

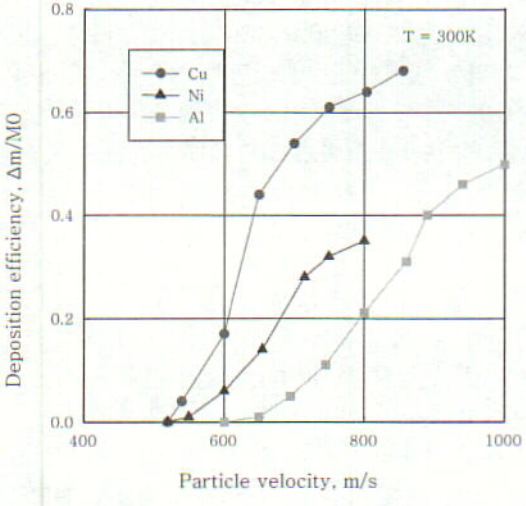

Fig. 1 Deposition efficiency as a function of particle velocity for three typical metal powders at ambient jet temperature[1]

상기와 같이 소재 분말을 고온으로 용융시키지 않고 고상 상태에서 이루어지는 공정이므로 기존의 용사코팅 (Thermal Spray)의 단점을 극복하는 많은 장점을 지니게 된다. 많은 장점 중에서 특히, 나노 분말이나 비정질 분말을 코팅하거나 near net shape 제품 생산시 처음의 나노나 비정질 특성을 그대로 유지할 수 있는 공정으로 이해되고 있으며, 현재는 열적으로 민감한 Ti이나 Cu 같은 소재에서 좋은 결과가 발표되고 있다.

2. 기술적 배경

Cold spray 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 발달하였다. 연구원들은 입자를 실은 흐름이 초음속 공기흐름의 바람터널로 지나가서 금속표본에 쌓이는 실험을 보였다. 그 흐름은 속도가 증가함에 따라 입자의 흐름에 의한

시편의 마모 현상 및 코팅에 주목하였다. 이들은 이 원리를 기초로 하여 cold spray 기계를 발전시켰다. 그들은 또한 cold spray할 금속과 상업적으로 사용 가능한 것을 찾는 연구를 수행하였다[6-13]. 이 공정은 1994년 러시아 발명가들에 의해 미국특허권이 발표되었다[14].

1994년에는 발명자중 한명인 A. Papyrin 박사가 미국 미시건에 있는 국제제조과학센터 (National Center for Manufacturing Sciences)의 후원을 바탕으로 협력회사를 결성하기 위해 미국에 왔다. 이 모임에는 Ford Motors, General Motors, General Electric- Aircraft Engines와 Pratt & Whitney Division of United Technologies등의 중요한 미국 회사들이 포함되었다. 이런 협의는 미국에서 먼저 창설하였으며 cold spray의 가능성과 cold spray할 여러 금속들의 제조법을 공표하였다[15,16]. 1997년에 미국 Sandia 국립연구소에 cold spray의 가능성과 공정을 진단하고 modeling을 연구하는 것을 관리하는 국립연구소가 상설되었다[5].

3. 분사 과정의 개념

Fig. 2는 cold spray 시스템의 개요를 보여주고 있다[1,17]. 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 노즐 입구를 통해서 압축된 de Laval 형태의 노즐로 넣어진다. 그 결과로서 아주 작은 대기압력으로의 팽창이 생기게 된다. 이 결과로서 초음속의 유출이 생긴다. 분말은 노즐의 고압측에서 넣어지고 정확한 측정기구에 의해 전달된다. 코팅 처리되지 않은 입자들은 아마도 구식의 먼지수집기구 등에 의해 계속해서 순환될 것이다.

고압의 압력으로 둘러싸인 장치 입구의 압축된 가스

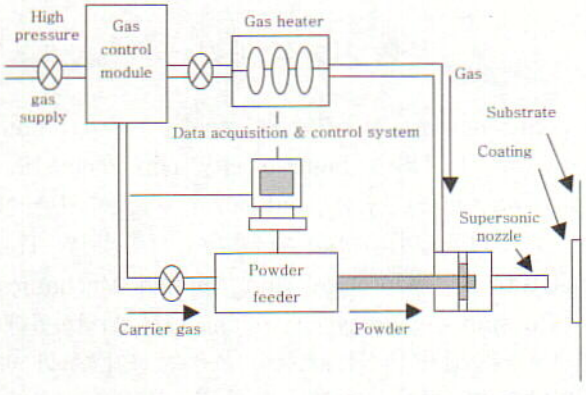

Fig. 2 Schematic representation of cold spray system[1,17]

는 초음속 가스 속도 증진을 위해 한곳에 집중시키는 노즐과 여러 갈래로 나뉘는 노즐을 통해 흐른다. 적절한 입구의 가스 압력과 더불어 노즐의 최소 내부 직경에서 가스 흐름의 속도는 국부적으로 초음속 속도에 이른다. 노즐의 여러 갈래로 나뉘는 부분에서 가스가 팽창하기 때문에 초음속의 속도는 개발되었다. 분말 입자들은 노즐의 한곳에 집중되는 부분으로 즉시 거슬러 올라가서 가스 흐름에 주입되어진다. 그리고 분말 입자들은 노즐이 아래로 진행되기 때문에 둘러싸여진 가스에 의해 가속되어 진다. 알루미늄과 같이 일부 밀도가 낮은 spray 재료의 충분한 spray 분말 입자의 속도는 실온에서 압축된 공기를 사용함으로써 얻어질 수 있다. 그렇지만 다른 spray 재료들의 필요한 분말 속도를 얻기 위해서는 노즐의 입구에서 국부적인 가스 속도를 증가시키는 것이 필요할 것이다. 이것은 공기보다는 헬륨과 같은 분자의 무게가 낮은 가스를 사용함으로서 달성할 수 있다. 또는 밀도를 낮추기 위해 가스를 예열함으로써 달성할 수 있다. 그렇지만 가스가 팽창하고 노즐의 여러 갈래로 나뉘는 부분에서 가속되어짐에 따라 급속히 냉각한다. 그러므로 가열된 가스와 함께 접촉되어 있는 고체분말의 체류시간이 매우 중요하다. 이와 같은 상호 교환은 cold spray 노즐의 팽창된 부분에서 나타난다[18-21].

가스가 팽창하기 때문에 분말의 밀도는 감소하고 분말의 속도는 증가한다. 가스 속도가 증가하고 가스 밀도가 감소하는 대조적인 효과는 다음과 같은 흥미로운 결과를 산출했다. Cold spray에서 분말 속도는 spray 노즐의 여러 갈래로 나뉘는 부분의 정확한 내부 결합구조에 크게 민감하지 않다는 것이다. 그러므로 한개의 노즐의 설계는 재료의 넓은 범위에 걸쳐 효과적으로 사용되어질 수 있다. Cold spray 과정에서 입구의 가스 압력은 일반적으로 200~400 psig (135~270 kPa)의 범위로 떨어진다. 가스 동력 논문에서 설명한 바와 같이 입구가스 압력은 가스 속도에 영향을 끼치지 않는다. 그렇지만 입구 가스 압력이 증가하는 것은 가스 밀도를 증가시키고 따라서 보다 더 나은 분자의 결합을 제공하고 최초의 분자 가속을 증가시킨다.

4. 입자 속도에 대한 가스 효과

이전에 언급한 러시아와 미국의 연구는 cold spray 코팅에서 spray 입자의 속도 변화를 일관되게 중요한 점으로 지적하였다[22-25]. 최근의 연구에서는 22±5.6 ㎛ 구형의 구리분말 입자를 여러 가지 속도를 선택하여 그것의 영향력을 측정하였다. Laser-two-focus (L2F) 속도계를 사용하여 spray 노즐 입구에서부터 10 mm 거

리에 기판을 띨어트려 놓은 상태에서 입자의 속도를 측정하였다. 결과적인 속도 분포는 공급재료와 다른 인자의 입자 크기의 범위에 달려있는 폭으로 본질적으로 Gaussian peak이다.

입자 속도의 의미는 Fig. 3에서 요약하고 있으며 이것은 다른 종류의 가스 (공기와 헬륨)와 가스 입구의 온도 변화 (25~500℃), 그리고 가스 입구에서의 압력 변화의 효과를 설명하였다[2]. 조건의 범위를 연구하였기 때문에, 기체 타입을 바꾸는 것은 입자속도에서 가장 큰 변화를 일으켰으며 헬륨은 압축공기의 가치보다 훨씬 높은 170~250 m/s의 가치에 달한다. 입자 속도를 바꾸는 효과적인 방법은 입구의 가스 온도이다. 헬륨은 입자속도를 25℃에서 400℃의 온도로 예열함으로써 입자의 속도가 증가하는 것이 가능하였다.

압축공기는 이와 같은 온도영역 이상에서의 일치하는 속도는 120 m/s이다. 유사하게, 압축공기의 속도 변화는 본질적으로 300~500℃에서 수평이다. 가스 동역학 모델은 이 행동을 미리 예견하지 못하고 있고, 그 이유도 아직 이해되지 못하였다. 그러나, 가스 동역학 모델에 기초를 두고 있는 노즐의 목 부분 지역에서의 가스 속도 (V)는 다음에 나오는 관계식에 의해 가스 특성이 관련된다[3].

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

여기서 γ는 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 비

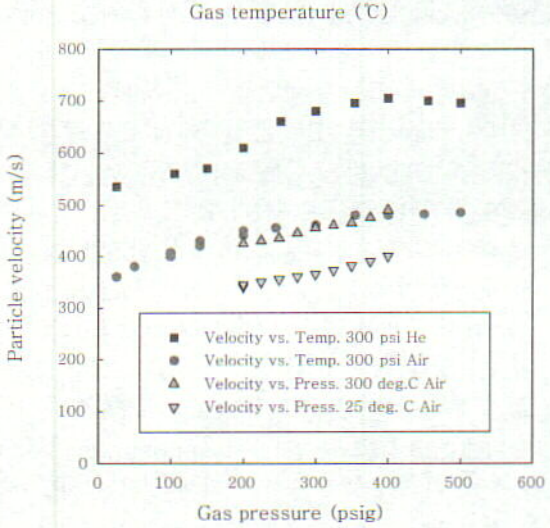

Fig. 3 Comparison of the influence of gas type, temperature, and pressure on particle velocity[2]

열과 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 기체 (예를 들면, 상수 γ)에 초기 기체 온도까지 직접적으로 비례하기 때문에, 입자속도는 초기 기체 온도에 일차원적으로 증가할 것이다. 이것의 다른 요소는 공기와 더 높은 측정 온도에서 헬륨의 입자 속도 증가의 관찰됨이 없음을 설명하여야 한다. 비록 가스 초기 압력이 V에 관계를 가지고 있지 않을지라도, 초기 압력을 증가시키는 것은 노즐에 가스의 밀도를 증가시킨다. 더 밀도가 높은 기체는 입자들에 더 인력을 미치며 그것은 주어진 노즐 길이를 넘어 더 효과적인 입자 가속에 기인하는 것이다. 압축된 공기에서, 200에서 400 psig으로부터 초기 가스 압력을 증가시키는 것은 오직 실내 온도 뿐만 아니라, 영상 300℃도 입자 속도에 있어서 16-17% 증가에도 그 결과가 있었다. 그러므로, 이 연구는 spray 시스템 운영의 실용적인 한계를 넘어 조사하였는데 가스 압력을 올리는 것은 가스 온도를 올리는 것만큼 입자 속도들을 증가시키지 않았다. 또한 더 높은 입자 속도들을 이루기 위하여 온도를 올리는 것은 가스 밀도가 감소하는 동안 가스 소비를 줄이는 측면에서 이익이 있다. 반대로 압력의 증가는 가스 소비를 증가한다. 그러나, 사실 더 높은 가스 온도에서 측정된 입자속도는 계속 증가하지 않는다.

5. 입자 속도에 대한 입자 크기 및 밀도의 영향

입자 속도에서 입자 사이즈와 밀도의 영향을 연구하기 위한 몇몇 초기 실험이 실시하였다 (Fig. 4). 이 결과는 더 높은 밀도를 가지고 있는 입자와 더 큰 입자가 현저히 낮은 속도들로 이동한 것을 보여준다[2]. 이것은 간단한 분석적 모델과 일치하며 그것은 입자 속도가 입자 직경과 밀도의 제곱근과 역으로 변화하여야만 한 것을 나타낸다. 입자 속도가 100 m/s보다 더 낮은 값에서 구리 분말을 이용한 것이 직경변화가 3 마이크론의 증가를 보인 것은 주목할만하며 이는 예상된 값보다 2배 큰 변화이다. 그러나, 알루미늄 분말을 이용한 것의 직경은 9 ㎛의 증가로 40 m/s 속도의 감소를 보이는데, 이것은 예상된 값보다 1/3보다 작은 값이다. 예상된 행동은 일차원적 가스흐름에서의 단일 입자를 가정한다. 그리고 측정은 사이즈 범위를 넘은 수천 입자의 평균 무게를 나타낸다. 그럼에도 불구하고 그것은 크기 및 밀도가 입자속도에 중요한 결과를 가질 수 있는 cold spray에 대한 스프레이 분말 밀도의 실험적인 결

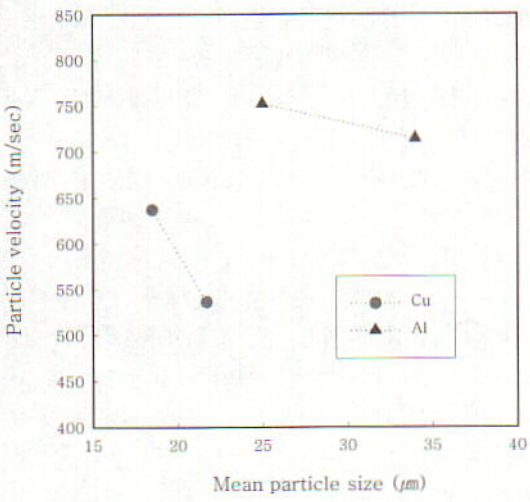

Fig. 4 Particle size and mass density effects on particle velocity for room temperature, 300 psig helium[2)]

과가 명백하다. 이것은 spray 증착 재료의 성질과 미세구조의 결과일지 모른다.

대체로, 더 적은 극소량들은 더 높은 속도를 보인다. 그러나 유용한 크기로의 감소를 제한을 하는 몇몇 변수는 있다. 실용적인 한계는 매우 미세한 입자의 취급과 공급에서의 어려움에 있다. 이는 입자 감소로 인한 부피 비 증가로 인한 표면 산화물 증가와 몇몇 재료들의 매우 고운 입자로 인한 폭발 위험성의 증가가 이유이다. 이 고려사항 뿐만 아니라 공기역학에 의해 부과된 크기 제한이 있다. Cold spray 장치로부터 초음속의 가스 분사가 고정된 타켓 표면에 치기 때문에 타켓에 인접한 곳에 즉시 높은 압력의 충격파가 생긴다. 모형 제작은 이 충격파가 대략 5 마이크론 보다 아래의 입자 크기 감소로서 구리 spray 입자들을 굴절시키고 감속하는 것을 이룰 수 있는 것을 보여주었다. 실무적인 입장에서 경험적으로 입자의 크기는 대략 45 마이크론 (325 mesh)에서 10 마이크론 (진공 plasma spray 입자의 전형적인 크기 영역)이 cold spray 증착에 대체로 적합하다는 것을 가리킨다.

6. 코팅 증착 메커니즘 및 특성

기판 재료에 코팅되는 고체분말의 변형과 접합에 대한 정확한 메카니즘은 끝내 밝혀지지 않고 있다. Cold spray에서 변형이 나타나지 않는 것은 최소 임계 속도 아래라고 러시아에서 최초 실험으로부터 관찰되었다. 이 임계 충격 속도는 분사되는 재료 증착뿐만 아니라, 타켓 표면의 재료에 의해 좌우된다. 그러나 임계 충격 속도는 일반적으로 대략 500~800 m/s의 범위에 있다[26-31]. 증착 메카니즘에 대한 현재 가장 일반적인 이론은 투사되는 분말의 소성변형과 밑에 놓여있는 얇은 표면 필름 (금속산화물과 같은)을 갈기갈기 찢는 것이다. 그러므로, 깨끗한 금속 표면은 높은 편재 압력과 접합 발생에서의 등각 접촉으로 제시된다. 표면 불순물들의 분열이 기하학적 인자들에 의해서 심지어 향상되는 것은 가능하다. 예를 들면, 국부적으로 평평한 표면에 충돌하고 있는 구형 입자가 점차적으로 접촉하는 것이 팽창하는 입자 또는 기판 경계면으로부터 떨어진 표면 불순물 중 일부를 제거할지도 모른다. 이러한 접합공정은 forge 용접 또는 폭발 용접과 유사하다. 그것은 impact에서의 유효 에너지가 필요한 소성 변형의 근거로 충분하기 때문에 퇴적 작용에 필요한 최저 임계속도를 설명할 수 있었다. 이 가설은 또한 많은 연성 금속 원소와 일부 고분자가 성공적으로 cold spray deposit 했다는 사실과 함께 양립한다. 그러나, 세라믹과 같은 취성 재료에 대한 실험들은 그들이 연성 매트릭스 재료와 함께 있지 않으면 성공적이지 않다.

사전 작업에서 컴퓨터 모델링과 미세조직 자료는 cold spray된 입자와 밑에 있는 기판에 나쁜 영향을 주는 심각한 소성 변형을 보여주었다. 그러나, 예측된 것 뿐만 아니라 실험적인 결과도 전형적인 cold spray 상태를 위한 어떤 국부적인 용융 발생의 증거를 제공하지는 않는다[32,33]. 실제로, 모델에 의해 보여진 온도 peak들은 연구된 물질의 융점 이하로 되어있다.

한 예로 cold spray된 구리 코팅의 미세 구조는 Fig. 5a에서 보여준다[17,33]. 이 cold spray된 구리에서 splat는 훨씬 더 높은 배율에서조차도 국부적인 용융의 명백한 증거와 뚜렷한 각을 이룬 경계들을 보여주지 못한다. 이것은 McCune 등에 의한 cold spray된 강철, 그리고 구리의 주사전자현미경과 투과전자현미경법 연구 결과에 모두 일치한다. Fig 5a에서 코팅은 또한 명백한 porosity (현미경 사진에 검은색 부분)를 나타내지는 않는다. 비록 작은 pore 또는 void가 개개의 splat에 침적된 후에 존재하더라도, 그것은 더 나아가서 충격에 의해 기인된 그 이상의 변형인 것 같다. Cold spray 기술의 가능한 이점이 산화 없이 주위 공기 환경에서 구리와 같은 산소에 민감한 재료를 코팅시킬 수 있는 능력은 더 일찍 기록되었다. Fig 5b는 주위 공기 환경에서 만들어진 plasma spray된 구리 코팅의 미세 구조를 보여준다. Plasma-spray 미세 구조는 용융 구리 방울들의 충돌에 의해 형성된 사실이라는 것을 지시하는 많은 둥글게 된 모습을 보여준다. 그것은 또한 구리 산화물의 상당한 양을 포함한다. 그것은 현미경 사진에서 회색밴드로 나타나며 많은 기공들은

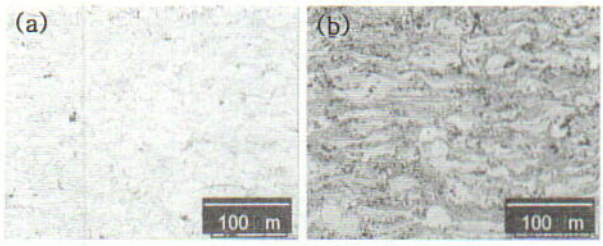

Fig. 5 Cross sectional microstructures of (a) cold sprayed and (b) atmospheric plasma sprayed copper[5]

현미경 사진에서 검은 지역들이다. 대조적으로, cold spray된 구리는 적은 기공도와 눈에 띠는 산화물이 보이지 않는다. 사실상, 구리 공급 원료 분말과 cold spray 증착된 산화물 농도는 각각 0.34±0.008 wt.%와 0.28±0.005 wt.%였다. 정확히 측정한 산소의 양에 있어서 관찰된 차이는 대단히 작다. 산화물의 이 명백한 작은 감소는 만약 중요하다면 추가적인 실험을 할지를 결정하는 것이 필요하다. 만약 효과가 진실하다면, cold spray된 재료의 좀더 낮은 산화물의 이유는 좀 많은 표면의 산화물을 가진 입자가 다소 조금의 개연성을 가지고 있는지도 모른다. 역시 이것은 처음 공급재료에 포함된 산화물의 증가없이 주변 대기 환경에서 구리로 cold spray 할 수 있다는 사실을 명백히 보여준다.

한편, McCune 등은 강과 구리의 cold spray된 코팅의 특성 측정값을 발표하였다[28,33]. 그들은 코팅이 쌓일 때 cold spray된 코팅의 잔류응력은 높은 속도로 미리 침적된 재료에 충돌하는 입자가 계속적으로 표면에 peening하는 경향이 있다는 것을 발견했다. 저자들은 또한 역학적으로 침적 동안에 재결정되었을지도 모르는 독특한 grain의 증거를 발표하였다. 추가로, 정확하게 잰 microhardness 값은 상대적으로 높고, 게다가 시종일관 cold deformation의 높은 등급이었다. 그러나, 상대적으로 적지만 as-deposited cold spray된 재료의 기계적 성질은 thermally spray된 경우와 같이, 개개 splat의 미세 구조보다는 오히려 inter-splat 경계의 성질에 의해 지배당한다.

7. Cold spray 코팅기술의 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 10mm).
- 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㎛보다 작은 분말 사용이 가능하다 (1~50㎛).

(9) Highly dissimilar 재료 코팅이 가능하다.
- layer by layer 코팅이 가능하다.

(10) Short standoff distance (5-25mm)를 사용한다.
- Minimal substrate preparation (masking)을 요구한다.
- 파이프 내경 코팅에 적당하다.

(11) Small spray beam (~5mm in diameter)을 사용한다.
- 정밀 부품 (Precise control, width up to 1mm)에 적당하다.

(12) 높은 생산성이 가능하다 (up to 15kg/hr).

(13) High deposition rate and efficiency (up to 95%)

(14) 분말 재사용이 가능하다. (up to 100%)

(15) 기판 예열을 최소로 한다.

(16) 작업의 안전성 향상이 이루어진다.
- 고온 가스 제트, radiation, 폭발 가스 사용이 없다.

8. 가능한 적용처

현재 cold spray 기술을 이용하여 상용화된 제품은 없다. 그러나, 미국 Sandia 국립연구소에서는 2003년에 상용화 제품 개발을 목표로 연구가 가장 활발하게 진행되고 있다. Fig. 6과 Fig. 7에서는 cold spray를 이용한 시편의 예를 보이고 있다[17]. 그 외에 가능한 적용처로 각광받을 수 있는 예를 다음과 같이 정리하였다.

(1) 내부식 및 내마모 코팅
- Light weight automobile engine

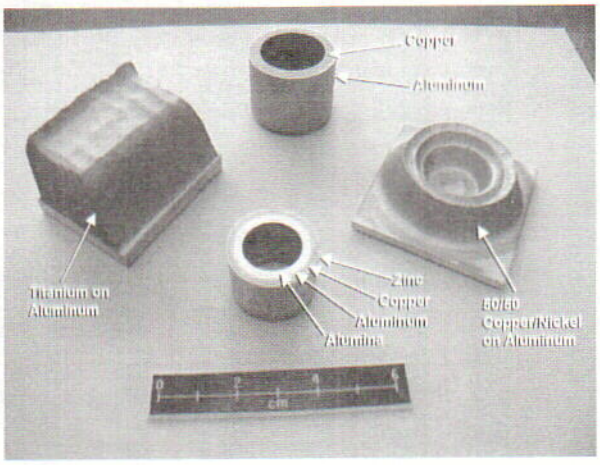

Fig. 6 Examples of cold sprayed deposits. Thick geometries developed using the cold spray process[17]

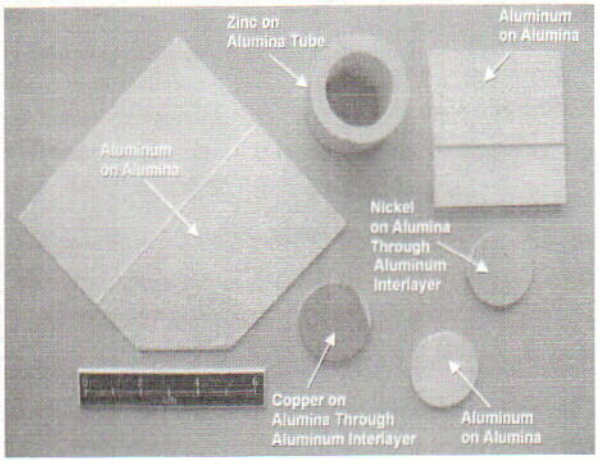

Fig. 7 Examples of cold sprayed deposits. Metals can be deposited on ceramics using the cold spray process[17]

(2) Defect repair (minimal masking, machinable)
(3) Direct fabrication (High DE, minimal masking, low residual stress)
(4) 파이프 내경코팅
- Cylinder bore coatings for internal combustion engines

(5) Phase and composition stability에 의한 Nano, amorphous, intermetallic (Titanium Aluminide) 코팅 및 bulk 소재 제작
(6) Plastic coatings without volatile solvents
(7) 세라믹 (혹은 glass) 기판에 금속 코팅
(8) High density copper lines as electrical leads for heat tolerant under-hood automobile electronics
(9) 군수 적용 예
- Vacuum tight seals in metal-to-ceramic bonds
- Low temperature alternative to welding
- Joining of dissimilar materials

(10) Layer by layer coating
(11) 그 외에 모든 산업에 적용 가능.

9. 결 언

Cold spray 기술은 이제 약 10년 정도 알려진 기술로 볼수 있다. 그동안의 연구에서 많은 금속 및 일부 cermet과 고분자 재료에 대한 우수한 연구 결과가 발표되고 있다[34-39]. 따라서 선진국에서는 현재 많은 관심을 기울이는 연구 분야이나, 현재까지는 상용화가 되지 않고 있다. 상용화의 걸림돌은 여러가지의 예을 들수 있겠다. 공정이 아직 잘 이해되지 않고, 노즐 막힘 현상이나, 미세 분말 송급이 균일하게 되지 않는 등의 기술적인 측면 외에도, 비싼 헬륨 가스를 사용하는 등의 경제적인 측면을 들 수 있다. 최근에는 이러한 헬륨 가스 재사용이나, 좀 더 큰 분말 입자를 사용하고자 하는 연구도 발표되고 있다[40]. 특히, 국내외적으로 나노분말이나 비정질분말 제작으로는 많은 연구가 진행되어 상용화 가능성을 제시하였으나, 이러한 분말을 사용하여 코팅이나 bulk 소재 제작에는 많은 한계를 보이고 있다. 따라서 Cold spray 기술이 이러한 한계를 극복할 수 있는 공정기술로 이해되고 있다[41].

Cold spray 기술은 기술 선진국에서도 미국을 제외하고는 모두 최근에 연구개발을 추진하고 있다. 따라서 국내에서도 이제라도 연구개발을 시작한다면 세계 동등 내지는 신제품 개발을 통한 국제 경쟁력을 단시일에 볼 수 있는 기술분야라고 사료된다.

참 고 문 헌

1. A. Papyrin : Cold spray technology, Advanced Materials & Processes, 2001, 49-51.
2. M.F Smith, J.E. Brockmann, R.C. Dykhuizen, D.L. Gilmore, R.A. Neiser, and T.J. Roemer : Cold spray direct fabrication - high rate, solid state, material consolidation, Materials Research Society Symposium Process, **542** (1999), 65-76.
3. T.H.V. Steenkiste : Kinetic spray: A new coating process, Key Engineering Materials, **197** (2001), 59-86.
4. T. Stoltenhoff, J. Voyer and H. Kreye : Cold spraying state of the art and applicability, International Thermal Spray Conference, 2002, p.366-374.
5. http://www.sandia.gov/coldspray/presentations, Cold spray workshop summary page.

6. A.V. Babkin, S.V. Ladov, V.M. Marinin, and S.V. Fedorov: Effect of shaped-charge jet compressibility and strength on the characteristics of their inertial stretching in free flight, Applied Mechanics and Technical Physics, **38** (1997), 177-184.
7. A.O. Tokarev : Structure of aluminum powder coatings prepared by cold gas dynamic spraying, Metal Science and Heat Treatment, **38** (1996), 136-139.
8. A.N. Papyrin, A.P. Alkimov and V.F. Kosarev : Spraying the current conducting coatings on electrotechnical unit by the CGS method, Proceedings of United Thermal Spray Conf., 1999, 288-290.
9. A.P. Alkimov, A.I. Gudilov, V.F. Kosarev, and N.I. Nesteriovich : Specific features of microparticle deformation upon impact on a rigid barrier, Applied Mechanics and Technical Physics, **41** (2000), 188-192.
10. A.P. Alkimov, V.F. Kosarev, and A.N. Papyrin : Gas-dynamic spraying. An experimental study of the spraying process, Applied Mechanics and Technical Physics, **39** (1998), 318-323.
11. A.P. Alkimov, V.F. Kosarev, and S.V. Klinkov : The features of cold spray nozzle design, J. of Thermal Spray Technology, **10** (2001), 373-381.
12. A.N. Papyrin, A.P. Alkimov, V.F. Kosarev, and S.V. Klinkov : Experimental study of interaction of supersonic gas jet with a substrate under cold spray process, Proceedings of the International Thermal Spray Conf., 2001, 423-431.
13. A. N. Papyrin, V. F. Kosarev, S. V. Klinkov, and A. P. Alkhimov : On the interaction of high speed particles with a substrate under the cold spraying, International Thermal Spray Conference, 2002, 380-384.
14. 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.
15. T. H. Van Steenkiste, J.R. Smith, R.E. Teets, J.J. Moleski, and D.W. Gorkiewicz : Kinetic spray coating method and apparatus, US Patent 6,139,913, Oct. 31, 2000.
16. T. H. Van Steenkiste, J.R. Smith, R.E. Teets, J.J. Moleski, and D.W. Gorkiewicz : Kinetic spray coating apparatus, US Patent 6,283,386 B1, Sep. 4, 2001.
17. R.E. Blose, T.J. Roemer, R.T. Nichols, A.J. Mayer, D.A. Beatty, and A.N. Papyrin : Commercial cold spray system with data logging, data acquisition, process control and feed back, International Thermal Spray Conf. presentation brochure, 2002.
18. R.C. Dykhuizen and M.F. Smith: Gas dynamic principles of cold spray, J. of Thermal Spray Technology, **7** (1998), 205-212.
19. K. Sakaki, N. Huruhashi, K. Tamaki and Y. Shimizu : Effect of nozzle geometry on cold spray process, International Thermal Spray Conference, 2002, 385-389.
20. T. H. Van Sreenkiste, J. R. Smith, R. E. Teets, J. J. Moleski, D. W. Gorkiewicz, R. P. Tison, D. R. Marantz, K. A. Kowalsky, W. L. Riggs, P. H. Zajchowski, B. Pilsner, R. C. McCune, and K. J. Barnett : Kinetic spray coatings, Surface & Coating Technology, **111** (1999), 62-71.
21. K. Sakaki and Y. Shimizu : Effect of the increase on the entrance convergent section length of the gun nozzle on the high-velocity oxygen fuel and cold spray process, J. of Thermal Spray Technol., **10** (2001), No. 3, 487-496.
22. R.C. Dykhuizen, M.F. Smith, D.L. Gilmore, R.A. Neiser, X. Jiang, and S. Sampath : Impact of high velocity cold spray particles, J. of Thermal Spray Technology, **8** (1999), 559-564.
23. A. E. Segall, A.N. Papyrin, J.C. Conway, Jr., and D. Shapiro : A cold-gas spray coating process for enhancing titanium, JOM, Sep. 1998, 52-54.
24. H. Kreye and T. Stoltenhoff : Cold spraying - A study of process and coating characteristics, Proceedings of The 1st International Thermal Spray Conf., 2000, 419-422.
25. M.K. Decker, R.A. Neiser, D. Gilmore, and H.D. Tran : Microstructure and properties of cold spray nickel, Proceedings of the International Thermal Spray Conf., 2001, 433-439.
26. D.L. Gilmore, R.C. Dykhuizen, R.A Neiser, T.J. Roemer, and M.F. Smith : Particle velocity and deposition efficiency in the cold spray process, J. of Thermal Spray Technology, **8** (1999), 576-582.
27. J. Karthikeyan, C.M. Kay, J. Lindeman, R.S. Lima, and C.C. Berndt : Cold spray processing of titanium powder, Proceedings of The 1st International Thermal Spray Conf., 2000, 255-262.
28. R.C. McCune, R.P. Cooper, and O.O. Popoola : Post-processing of cold-spray deposits of copper and iron, Proceedings of The 1st International Thermal Spray Conf., 2000, 905-908.
29. T. Stoltenhoff, H. Kreye, H.J. Richter, and H. Assadi : Optimization of the cold spray process, Proceedings of the International Thermal Spray Conf., 2001, 409-416.
30. J. Vlcek, H. Huber, H. Voggenreiter, A. Fischer, E. Lugscheider, H. Hallen, and G. Pache : Kinetic powder compaction applying the cold spray process, Proceedings of the International Thermal Spray Conf., 2001, 417-422.
31. H. Gabel and R. Tapphorn : Solid-state spray forming of Aluminum near-net shapes, JOM, **8** (1997), 31-33.
32. J.A. Browning : Thermal spray method utilizing in-transit powder particle temperatures below their melting point, US Patent 5,271,965, Dec. 21, 1993.

33. R.C. McCune, W.T. Donlon, O.O. Popoola, and E.L. Cartwright : Characterization of copper layers produced by cold gas-dynamic spraying, J. of Thermal Spray Technology, **9** (2000), 73-82.
34. T. Shmyreva, E. Popov, A. Papyrin, and E. Smith : Powders and new materials, Proceedings of United Thermal Spray Conf., 1999, 736-739.
35. J. Vlcek, J. Zwick, H. Huber, U. Schnaut, and E. Lugscheider : Spray forging of powder material applying the cold spray process, International Thermal Spray Conference, 2002.
36. S. Sampath, H. Herman, A. Patel and R. Gambino : Thermal spray techniques for fabrication of meso-electronics and sensors, Materials Research Society Symposium, **624** (2000), 181-188.
37. B. Jodoin : Effects of shock waves on impact velocity of cold spray particles, Proceedings of the International Thermal Spray Conf., 2001, 399-407.
38. K. Sakaki and Y. Shimizu : Improvement in wire arc spray by super sonic cold gas jet, Proceedings of the International Thermal Spray Conf., 2001, p.441-445.
39. P. Richter, W. Krommer and P. Heinrich : Equipment engineering and process control for cold spraying, International Thermal Spray Conference, 2002, 375-379.
40. T. H. Van Steenkiste, J. R. Smith, R. E. Teets : Aluminum coatings via kinetic spray with relatively large powder particles, Surface and Coatings Technology, **154** (2002), 237-252.
41. V. Shukla, G. S. Elliott, and B. H. Kear : Nanopowder deposition by supersonic rectangular jet impingement, J. of Thermal Spray Technol., **9** (2000), No. 3, 394-398.

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

• 권영각(權寧珏)
• 1952년생
• RIST 용접센터
• 파괴역학, 부식파괴
• e-mail: ygkweon@rist.re.kr

• 이창희(李昌禧)
• 1956년생
• 한양대학교 재료공학부
• 용접야금
• e-mail: chlee@email.hanyang.ac.kr