

## 자동차부품 적용 저온분사 코팅기술

김 형 준

### Cold Sprayed Coatings for Next Generation Automobile Parts

Hyung-Jun Kim

본 기술해설에서는 현재 미국의 Sandia 국립연구소와 포드자동차 연구소 및 GM 자동차회사의 부품전문 연구소인 Delphi 연구소를 중심으로 자동차 부품 적용을 위하여 활발히 연구되고 있는 일명 저온 분사 (cold spray 혹은 kinetic spray)라고 불리는 신 코팅 공정 기술을 소개하고, 자동차 부품을 중심으로 가능한 적용처에 대하여 논의하고자 한다.

#### 1. 저온 분사 기술 개요

일명 cold spray라 일컬어지는 코팅공정은 보통 1~50  $\mu\text{m}$  (최근에는 200  $\mu\text{m}$ 까지 가능하다고 보고됨)의 입도를 가진 금속이나 복합재료 분말을 압축가스 (He, N<sub>2</sub>, 공기, 혹은 혼합 가스)의 초음속 제트로 가속시키면, 분말소재의 소성변형과 결합을 줄만한 충분한 속도 (보통 300~1300 m/sec), 즉, 임계속도에 이르게 되어 코팅이 형성된다는 신코팅공정 기술이다. 코팅 형성 기구는 일반적으로 고속의 충돌이 분말의 얇은 금속산화막을 파괴하여 순간적으로 높은 압력과 온도에 의해 원자간 결합을 형성하는 것으로 알려져 있다. 따라서 일반적으로 순수한 고상상태 공정으로 이해되고 있으며, 최근에는 나노소재 코팅기술나 일체화성형 공정기술로 많은 관심을 받고 있다. 코팅공정시 압축가스의 온도를 가열하면 (보통 최대 600°C까지) 같은 가스압력에서 가스 속도의 증대로 인하여 충돌입자의 부착율을 증가시킬 수 있게 된다<sup>1-5)</sup>.

Fig. 1은 cold spray의 기본 개념에 관한 초기 러시아의 연구결과를 보이고 있다<sup>1)</sup>. 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 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 금속에  $V^*$ 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.

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 일체화 성형 제품 생산시 처음의 나노나 비정질 특성을 그대로 유지할 수 있는 공정으로 이해되고 있으며, 현재는 열적으로 민감한 Ti이나 Cu 같은 소재에서 좋은 결과가 발표되고 있다.

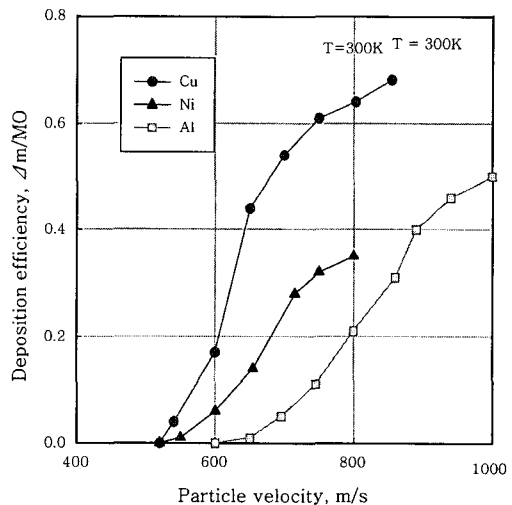


Fig. 1 Deposition efficiency as a function of particle velocity for three typical metal powders at ambient jet temperature<sup>1)</sup>

## 2. 기술적 배경 및 동향

Cold spray 코팅기술은 'cold gas-dynamic spraying (CGDS)', 'high-velocity non-combustion spraying', 또는 간단히 'kinetic spray' 처럼 다양한 이름으로 알려졌으며, 1980년대 중반에 시베리아의 The Institute of Theoretical and Applied Mechanics of Russian Academy of Science에서 최초로 현상이 발견되었다. 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<sup>6-13)</sup>. 이 공정은 1994년 러시아 발명가들에 의해 미국특허권이 발표되었다<sup>14)</sup>.

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 Technologies 등의 중요한 미국 회사들이 포함되었다. 이런 협의는 미국에서 먼저 창설하였으며 cold spray의 가능성과 cold spray할 여러 금속들의 제조법을 공표하였다<sup>15,16)</sup>. 1997년에 미국 Sandia 국립연구소에 cold spray의 가능성과 공정을 진단하고 모델을 연구하는 것을 관리하는 국립연구소가 상설되었다<sup>5)</sup>.

현재에는 2002년에 저온 분사 장치를 세계 최초로 상용화한 미국의 K-tech, Inovati, 그리고, 독일의 CGT (Cold Gas Technology) 등이 선두를 달리고, 21세기에 들어와서는 영국 (TWI), 일본 (Plasma Giken), 중국, 호주 (CSIRO) 등지에서도 연구가 진행되고 있다. RIST에서도 2002년도에 자율과제를 통하여 국내 최초로 저온 분사 장치를 제작하여 각종 금속 코팅뿐만 아니라, 나노 WC-Co와 같은 초경재료에 대하여도 우수한 코팅 제조에 성공하여 현재는 상용화 장치 개발에 관한 과제가 진행되고 있다<sup>15-17)</sup>.

Fig. 2에서는 저온 분사 장치의 개략도를 보이고 있다. 입구에서의 가스는 입자 속도 증대를 위한 주가스와 분말 송급을 위한 분말 송급가스로 나뉘게 된다. 일반적으로는 같은 압력 조건에서 가스 속도 증대를 위하여 주 가스만을 예열하지만, RIST에서 개발된 장치는 분말도 동시에 예열하는 장치를 분말 송급통과 노즐

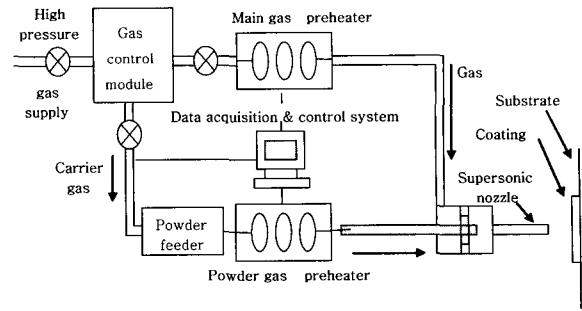


Fig. 2 Schematic representation of cold spray system<sup>1,17)</sup>

사이에 위치하여 일반적으로 저온 분사 공정으로는 어렵다고 인식되는 초경이나 벌크 비정질 합금 같은 인성이 부족한 소재 코팅 연구를 위하여 구성되어 있다. 원리는 비교적 간단한 논리로서 저온 분사 코팅 형성 메커니즘은 소재의 인성이 증대될수록 용이하게 코팅되므로 소재의 온도 상승에 따른 인성 증대로 인한 코팅 용이성을 기대하였다. 저온 분사 장치의 다른 주요한 부품은 소위 De Laval 형태의 노즐로서 즉, converge-diverge되는 형태의 노즐을 통하여 가스 속도 극대화를 통한 입자 속도 극대화를 추구하는 장치이다.

## 3. 저온 분사 기술의 장점

저온 분사 공정기술의 장점은 다음과 같이 정리될 수 있다.

- (1) 고상상태 공정이므로 산화와 바람직하지 않은 상을 피할 수 있다.
  - 낮은 산화물을 지닌다.
  - 열적으로 민감한 소재 (Ti, Cu, etc) 코팅이 가능하다.
- (2) 최초 입자 재료의 고유 물성 유지가 가능하다.
  - Nano, amorphous, intermetallic 재료의 코팅 및 일체화 성형부품 제작이 가능하다.
- (3) 낮은 잔류응력을 유도한다.
  - 응고 응력이 존재하지 않으므로 두꺼운 코팅이 가능하다 (up to 30 mm).
  - 일체화 성형 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 μm보다 작은 분말 사용이 가

능하다 (1~50 μm).

- (9) Highly dissimilar 재료 코팅이 가능하다.
  - layer by layer 코팅이 가능하다.
- (10) Short standoff distance (5-50 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) 기관 예열을 최소로 한다.
- (16) 작업의 안전성 향상이 이루어진다.
  - 고온 가스 제트, radiation, 폭발 가스 사용이 없다.

#### 4. 자동차 부품 적용 가능처

현재 저온 분사 기술을 이용하여 상용화된 제품은 2003년에 독일에서 최초로 PC에서의 heat sink에 적용된다고 보고된 점이 유일하다. 그러나, 미국을 중심으로 한 저온 분사 기술 선진국에서는 자동차 부품 적용에 관심을 두고 있다. 현재 미국 자동차 회사 및 부품회사에서 저온 분사 기술을 이용한 가능한 적용처로 소개하고 있는 분야를 정리하면 다음과 같다.

##### (1) 자동차 condenser

현재 국내 자동차 부품회사에서 제작하는 자동차 컨덴서는 Fig. 3에서 보이는 바와 같이 Al 합금 모재에 Al 합금 냉각핀을 붙이기 위하여 브레이징 공법을 사용하고 있다. 이 공법은 크래딩한 냉각핀을 가공해야 하는 이중 공정으로서 RIST에서는 태판테크를 주관으로 하는 2010 생기반과제를 통하여 저온 분사 공정을 통한 공정 단축, 자동화 및 생산성 향상 목적으로 2003년부터 3년간 연구를 진행하고 있다.

##### (2) Selective Galvanizing

자동차 도금강판의 내부식성 향상을 위한 방편으로 부식이 심한 부위 즉, Fig. 4와 같은 부위에 추가로 저온 분사 공정을 통하여 Zn 코팅시 내부식성 향상을 도모할 수 있다는 점을 보고하고 있다. 즉, 내부식성은 Zn 코팅 두께가 증가할수록 증대하므로 기존에는 Zn

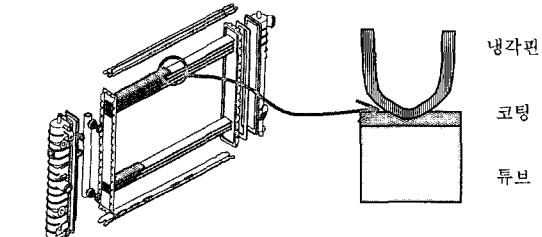
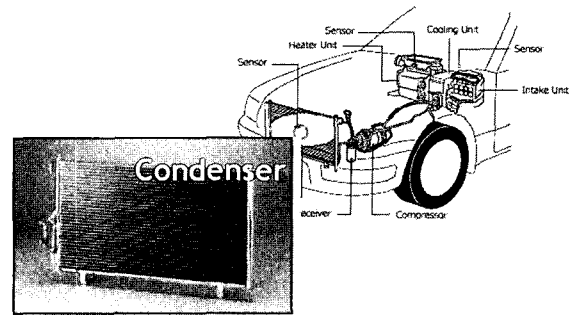


Fig. 3 Schematic view of condenser in automobile

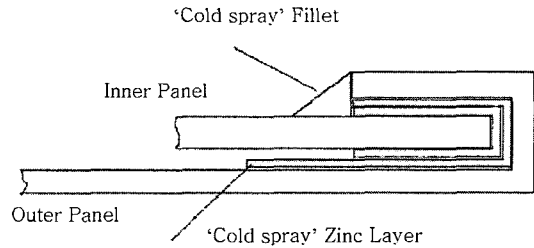
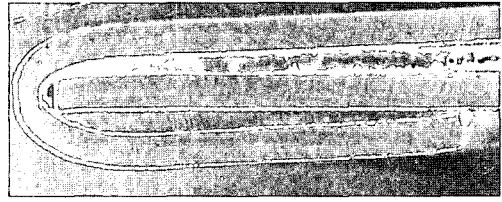
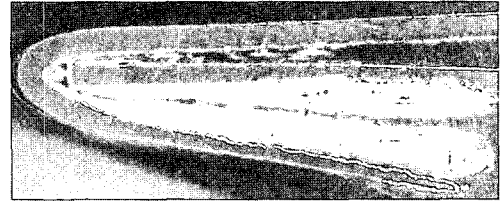


Fig. 4 Galvanized steel hem structure



Zn-20Al Cold-spray internal surfaces 50 microns



Baseline EG-60 Steel

Fig. 5 Cross sectional details of hem flanges exposed to cyclic salt-water corrosion tests

도금 두께가 10~20 μm 정도에 불과하므로, 그 Zn 도금 위에 0.05 내지 0.1 mm의 저온 분사 Zn 코팅을 통하여 부식특성이 현재하게 차이가 나는 현상을 Fig. 5과 6에서 증명하고 있다. Fig. 7에서는 단면 조직사진을 통하여 코팅두께를 비교하고 있다.

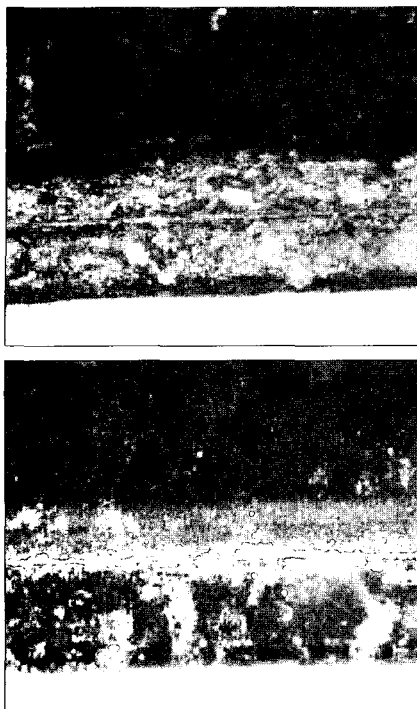


Fig. 6 Cyclic salt-water corrosion testing of baseline (top) and selectively galvanized (bottom) hem structures

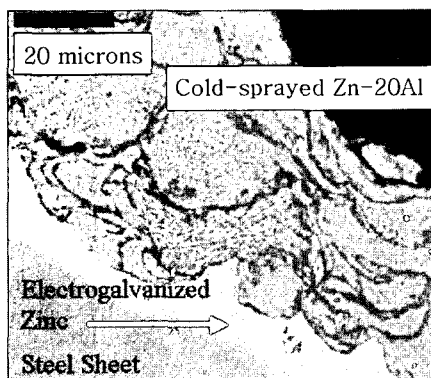


Fig. 7 Cold-sprayed Zn-20Al alloy powder layer on EG60 electro-galvanized steel sheet

(3) Repair of thermal spray tooling (rapid tooling)  
 현대의 자동차 회사에서는 시제품 금형과 생산용 금형과의 차이를 두지 않고, 시제품 금형을 설계 변경에 따른 보수용접을 통하여 생산용 금형으로 사용하고 있다. 따라서 보수용접이 점차 중요한 기술로 대두되고 있으나, 금형 소재의 대부분은 주철을 사용하므로 보수용접이 용이하지 않다. 따라서 Ni buffer layer 대신에 저온 분사 공정으로 적층하여 생산성 향상과 내마모 보수용접을 균열없이 할수 있는 대체기술로 검토되고 있으며, 그 예로서 조직사진을 Fig. 8과 9에서 보이고 있다.

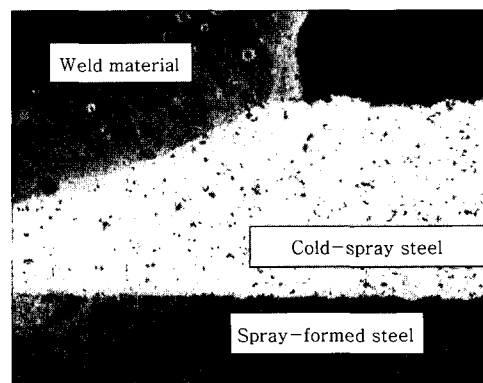


Fig. 8 Repair of thermally-sprayed steel tooling material using a cold-sprayed steel intermediate layer on which a conventional weld bead was developed.

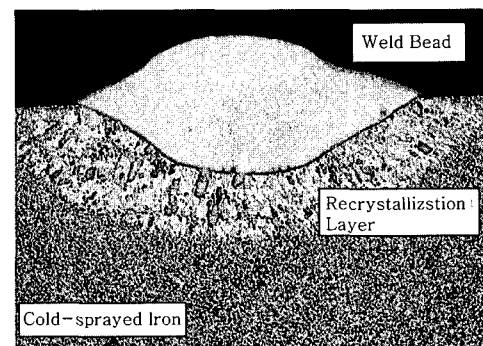


Fig. 9 Filler-metal weld bead readily formed on cold-sprayed iron structure, showing thermal transport evidenced by recrystallization and grain growth below the bead

그 밖의 가능한 적용처를 요약하면 다음과 같다.

- (4) Steel fuel tank weld seam repair (blazing point)
- (5) Barrier protection of magnesium (Al)
- (6) Ballistic processing of materials (conventional-shot peening)
- (7) Electrically conductive polymer by implantation of graphite particle
- (8) Circuits (power steering control), Cu on alumina
- (9) Electric machines (pure Fe-Ancor steel, NdFeB/Fe, NdFeB/Cu)
- (10) Hand held potable cold spray machine
- (11) Cu metallization
  - direct deposit for tailorable junction blocks or interconnects such as with the alternator diode plate
- (12) High density copper lines as electrical leads for heat tolerant under-hood automobile electronics

## 5. 결 언

저온 분사 공정 기술은 이제 약 10년 정도 알려진 기술로 볼수 있다. 그동안의 연구에서 많은 금속 및 일부 cermet과 고분자 재료에 대한 우수한 연구 결과가 발표되고 있다<sup>18-20)</sup>. 따라서 선진국에서는 현재 많은 관심을 기울이는 연구 분야이나, 현재까지는 상용화가 제한적이다. 상용화의 걸림들은 여러가지의 예를 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 들수 있다. 최근에는 이러한 헬륨 가스 재사용이나, 좀 더 큰 분말 입자를 사용하고자 하는 연구도 발표되고 있다<sup>21,22)</sup>. 특히, 국내외적으로 나노분말이나 비정질분말 제작으로는 많은 연구가 진행되어 상용화 가능성을 제시하였으나, 이러한 분말을 사용하여 코팅이나 bulk 소재 제작에는 많은 한계를 보이고 있다. 따라서 저온 분사 공정기술이 이러한 한계를 극복할 수 있는 공정기술로 이해되고 있으며, RIST에서도 우수한 연구결과가 나오고 있다<sup>15,16,23)</sup>.

저온 분사 공정기술은 기술 선진국에서도 미국과 독일을 제외하고는 모두 최근에 연구개발을 추진하고 있다. 따라서 국내에서도 RIST를 중심으로는 연구를 활발히 진행하여 전세계적인 기술수준에서 다음 그룹 정도로 이해하고 있다. 따라서 연구개발을 통하여 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. T. H. Van Steenkiste, 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
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, 366-374
5. [www.sandia.gov/coldspray/presentations/](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, p88-290
9. A.P. Alkimov, A.I. Gudilov, V.F. Kosarev, and N.I. Nesterovich : *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. Alkimov : *On the interaction of high speed particles with a substrate under the cold spraying*, International Thermal Spray Conference, 2002, 380-384
14. A.P. Alkimov, 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. H.J. Kim, C.H. Lee, and S.Y. Hwang: *Fabrication of WC-Co coatings by cold spray deposition*, Surface and Coatings Technology, Vol. 191 (2005), No. 2-3, 337~342
16. H.J. Kim, C.H. Lee, and S.Y. Hwang: *Superhard nano WC-12%Co coating by cold spray deposition*, Materials Science & Engineering A, Vol. 391 (2005), No. 1~2, 243-248
17. 김형준, 정덕환, 배석천, 이창희: *저온 분사시 in-situ 분말 예열에 따른 코팅층 평가*, 대한금속재료학회지, 43-10 (2005), 660~666
18. 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
19. B. Jodoin : *Effects of shock waves on impact velocity of cold spray particles*, Proceedings of the International Thermal Spray Conf., 2001, 399-407.
20. K. Sakaki and Y. Shimizu : *Improvement in wire arc spray by super sonic cold gas jet*, Proceedings of the International Thermal Spray Conf., 2001, 441-445

21. P. Richter, W. Krommer and P. Heinrich : *Equipment engineering and process control for cold spraying*, International Thermal Spray Conference, 2002, 375-379
22. 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
23. V. Shukla, G. S. Elliott, and B. H. Kear : *Nanopowder deposition by supersonic rectangular jet impingement*, J. of Thermal Spray Technol., 9-3 (2000), 394-398



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