

스프레이 코팅 기술

이 창 희†

Spray Coating Technology

Changhee Lee

Key Words: Thermal spraying(열용사), Kinetic spraying(저온분사)

Abstract

Spray coating is a versatile surface modification technology in which coating is built-up based on the successive deposition of micron-scaled particles. Depending on the coating materials, the coatings can meet the required mechanical properties, corrosion resistance, and other properties of base materials. Spraying processes are mainly classified into thermal and kinetic spraying according to their bonding mechanism and deposition characteristics. Specifically, thermal spraying process can be further classified into many categories based on the design and mechanism of the process, such as frame spraying, arc spraying, atmospheric plasma spraying (APS), and high velocity oxygen-fuel (HVOF) spraying, etc. Kinetic spraying or cold gas dynamic spraying is a newly emerging coating technique which is low-temperature and high-pressure coating process. In this paper, overall view of thermal and kinetic spray coating technologies is discussed in terms of fundamentals and industrial applications. The technological characteristics and bonding mechanism of each process are introduced. Deposition behavior and properties of technologically remarkable materials are reviewed. Furthermore, industrial applications of spray coating technology and its potentials are prospected.

1. 서 론

스프레이 코팅 기술은 일반적으로 마이크론 크기를 갖는 입자의 성공적인 적층에 의해 코팅이 형성되는 표면 개질 기술이다. 코팅 재료의 다양한 특성에 따라, 형성된 코팅은 기계적 특성, 내부식 특성, 내마모 특성 등과 같은 다양한 요구 특성을 충족시킬 수 있다. 스프레이 코팅 공정은 코팅의 적층 기구 및 특성에 따라 크게 열용사 공정과 저온분사 공정으로 나누어진다. 열용사 공정에서는 고온의 열원에 의한 열 에너지가 유동장 내 비행입자의 완전용융 또는 부분용융을 일으켜, 용융된 입자가 코팅 대상 면과 충돌할 때, 급속한 응고과정을

거쳐 코팅이 형성된다. 더욱이, 열용사 공정은 열원 및 공정인자(공정가스의 온도, 비행입자의 속도)에 따라 Fig. 1에서와 같이, Frame spraying(FS), Arc spraying(AS), Atmospheric plasma spraying(APS), Detonation-gun(D-Gun) spraying, High velocity oxygen-fuel(HVOF) spraying 등의 공정으로 세분화된다. 한편, 이러한 열용사와는 대조적으로 최근 새롭게 등장한 저온분사는 모재와의 충돌 전, 입자의 용융 없이 초음속 가스에 의해 가속된 비행입자의 운동에너지만으로 적층이 가능한 신 코팅 기술이다. 입자와 모재 간 고속 충돌을 통해 야기된 고변형률 소성 변형에 의한 계면의 단열 온도 상승이 성공적인 접합을 유발하는 주요 적층 기구로 받아들여지고 있다⁽¹⁻⁵⁾.

본 기술해설에서는 열용사 및 저온분사 코팅 기술에 대한 전반적인 내용을 해당 기초 이론 및 산업적 응용 측면에서 기술하고, 각 공정의 적층 원리 및 기술적 특

(2008년 10월 9일 접수 ~ 2008년 12월 4일 심사완료)

†책임저자, 회원, 한양대학교 신소재공학부

E-mail : chlee@hanyang.ac.kr

TEL : (02)2220-0388 FAX : (02)2299-0389

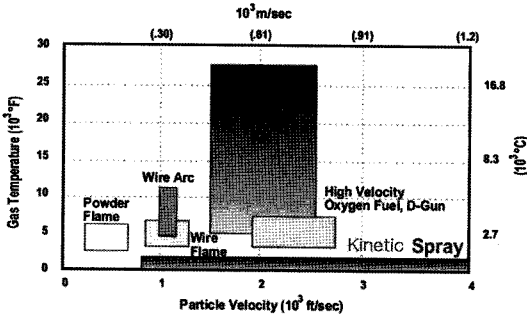


Fig. 1 Comparison of spray coating technologies

정을 소개하고자 한다. 또한, 기술적으로 주목할 만한 재료들의 적층 거동 및 특성에 대해 논의하고, 스프레이 코팅 기술의 산업적 응용 및 잠재 가능성에 대해 조망하고자 한다.

2. 스프레이 코팅 공정

2.1 열용사(Thermal spraying)

열용사 공정은 앞서 소개한 바와 같이, 고온(3500-15000K)의 열원(plasma, flame, arc 등)에 의한 열 에너지와 고압 공정가스의 유입에 의한 운동 에너지가 유동장 내에서 열/운동량 전달을 통해, 입자를 용융시키고, 일정 이상의 속도(300-800 ms⁻¹)로 가속시킴으로써, 코팅 대상 면과의 충돌 시, 입자의 퍼짐 혹은 일부 소성변형과 급속 응고과정을 거쳐, 모재와 접합을 형성한다^(6,7). 따라서, 입자 적층 후, 코팅의 미세조직은 Fig. 2에 도시된 바와 같이 층상구조(lamellar structure)의 형태를 띠게 된다. 본 열용사 공정은 1900년대 Frame spraying을

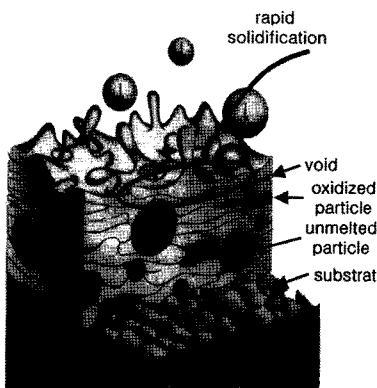


Fig. 2 Coating structure of thermal spraying

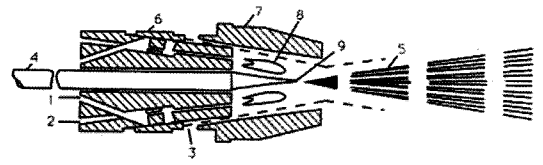


Fig. 3 Sketch of flame spraying of wire/rods⁽⁶⁾; 1. oxygen; 2. fuel gas; 3. compressed air; 4. wire/rod; 5. stream of molten droplets; 6. working gas nozzle; 7. compressed air cap; 8. flame; 9. wire molten

시작으로, 1920년대에 arc spraying이 등장하였고, 1940년대에 처음으로 Plasma spraying 기술이 도입되었다. 또한, 1960년대에는 Detonation-gun(D-Gun) spraying이, 1980년대에는 High velocity oxygen-fuel(HVOF) spraying이 개발되어 산업에 활용되기에 이르렀다.

본 장에서는 각 열용사 공정의 원리 및 기술적 특징을 소개하고자 한다.

2.1.1 Frame spraying (FS)

Frame spraying은 Fig. 3에 도시된 바와 같이 powder와 wire 형태의 재료를 이용하는 두 가지 기술로 분류된다. 이 기술은 산소와 같은 연료 가스의 연소를 통해, powder 또는 wire를 가열하는 방식의 공정이기 때문에, ‘combustion flame spraying’이라고 칭하기도 한다. 산소와 연료의 비율은 1:1에서 1.1:1정도이며, 대기 분위기에서 실시하므로 분말의 산화나 탄화가 발생한다. Frame온도는 3000-3500K이며, 속도는 80-100 ms⁻¹이다. 연료가스의 유량과 압력, 산소의 유량과 압력은 torch 형상에 따라 변하게 된다. 일반적으로 분말의 입도분포가 좁을수록 코팅 품질에 양호한 영향을 미치며, 그 크기는 5-100 μm 정도를 사용한다. rod 재료는 주로 Al₂O₃나 Cr₂O₃가 사용되며, wire 재료는 Mo, Zn, Al 등이 사용되는데, 그 지름은 대개 3-6 mm 정도이다.

2.1.2 Arc spraying (AS)

Arc spraying은 Fig. 4와 같이, wire 형태의 재료에 한 쪽은 양극으로, 다른 한쪽은 음극으로 하여, 두 wire가 만나는 지점에 전기 arc를 발생시킨다. 따라서, 이 부근의 wire는 용융되며, carrier gas에 의해 가속된다. 연료 가스의 소모가 없으므로 환경 친화적이라는 장점이 있지만, 전도체 물질만을 사용할 수 있다는 한계를 지니고 있는 공정이다. 일반적으로 arc 온도는 약 6000K 정도이고, 속도는 150 ms⁻¹ 정도이며, arc의 전압이 높아 질수록 droplet의 크기가 커진다.

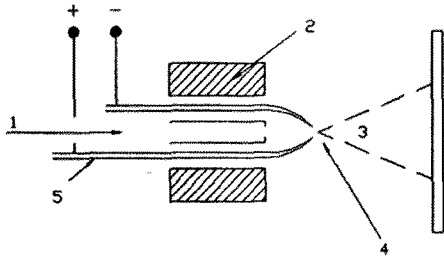


Fig. 4 Sketch of arc spraying⁽⁶⁾, 1. atomizing gas flow; 2. torch outer shield; 3. stream of molten particles; 4. electric arc; 5. consumable electrodes

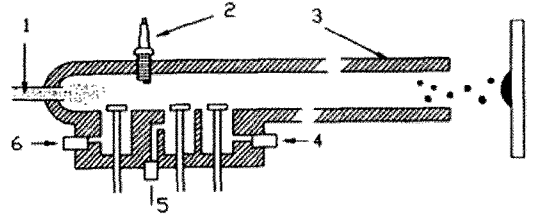


Fig. 6 Sketch of D-gun⁽⁶⁾, 1. powder injection; 2. spark plug; 3. gun barrel; 4. oxygen input; 6. nitrogen input

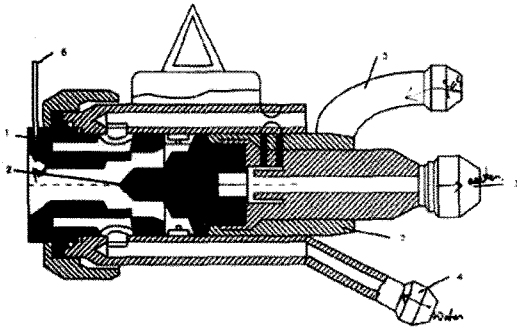


Fig. 5 Sketch of plasma spraying⁽⁶⁾, 1. anode; 2. cathode; 3. water outlet and cathode connector; 4. water inlet and anode connector; 5. working gases inlet; 6. powder injector; 7. electrical insulator

2.1.3 Atmospheric plasma spraying (APS)

APS의 torch는 Fig. 5와 같이, 주로 양극에는 Cu, 음극에는 W를 이용하여, 이 두 극 사이에 전기 arc discharge를 발생시킴으로써, working gas를 가열하여 기체 상태에서도 전기가 통하는 plasma를 형성시킨다. 이 plasma를 이용하여 분말을 가열시키고, 가속시키게 되며, 주로 working gas로는 Ar, Ar+H₂, Ar+He, N₂와 같은 단원자 기체나 비활성 기체가 사용된다. Plasma의 온도는 약 14000K이며, 속도는 800 ms⁻¹ 정도이다. 분자 상태의 기체(H₂)는 단원자 기체보다 큰 열전도도를 갖지만, 단원자 기체의 경우 훨씬 높은 속도에 도달하게 되므로, 이 두 기체를 혼합하여 사용하는 경우가 많다.

2.1.4 Detonation-gun (D-Gun) spraying

D-Gun은 Fig. 6과 같이, 긴 원통 형태를 지니고 있고, 내부 직경은 25 mm정도이며, 주위에는 냉각수가 흐르고 있다. 내부에 산소와 아세틸렌 가스를 혼합하여 분말과 같이 장입한 후 점화를 시키면, 이 두 가스 사이에 폭발 연소(detonation wave)가 발생하며, 이로 인해 분말

이 용융되고 가속된다. 공정온도는 아세틸렌 가스가 40% 정도일 때, 약 4500K까지 상승하며, 속도는 보통 750 ms⁻¹ 정도이지만, 최대 2930 ms⁻¹까지 얻을 수 있는 것으로 보고된다. 따라서, 이러한 분말의 빠른 가속으로 인하여, 기공도가 상당히 작은 치밀한 코팅이 형성된다.

2.1.5 High velocity oxygen-fuel (HVOF) spraying

HVOF는 Fig. 7과 같이 산소와 아세틸렌, 프로판과 같은 연료 기체와의 연소에 의해 높은 압력과 속도를 얻을 수 있는 공정이다. Fig. 8에 도시된 바와 같이, combustion chamber에서 연소가 발생하고, 노즐에서 분

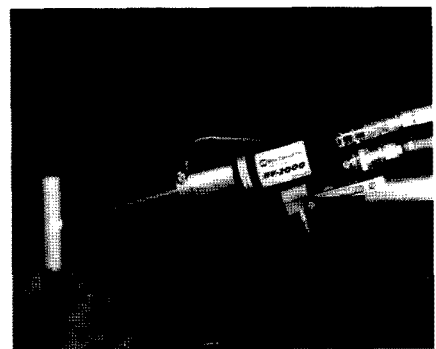


Fig. 7 Modern HVOF torch⁽⁶⁾

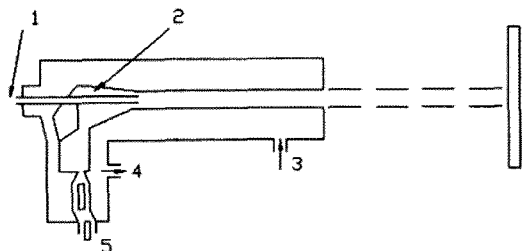


Fig. 8 Sketch of high velocity oxy-fuel torch⁽⁶⁾, 1. powder injection port; 2. combustion chamber; 3. cooling water; 4. oxygen inlet; 5. fuel inlet

말의 용융과 가속이 일어난다. 이 공정은 노즐의 형상에 따라 코팅의 특성이 상당히 좌우되며, 주로 de-Laval 형태의 노즐을 사용한다. 공정상의 최대 온도는 대략 3440K 정도이고, exhaust jet의 속도는 최대 2000 ms⁻¹ 까지 얻을 수 있다. 주로 탄화물 재료에 이용되며, 사용 분말의 크기는 5-45 μm 정도이다.

2.2 저온분사 (Kinetic spraying)

저온분사 코팅 기술은 ‘cold gas-dynamic spraying (CGDS)’, ‘high-velocity non-combustion spraying’, 또는 간단히 ‘kinetic spraying’과 같이 다양한 이름으로 알려졌으며, 1980년대 중반에 시베리아의 ‘The Institute of Theoretical and Applied Mechanics of Russian Academy of Science’에서 최초로 그 현상이 발견되었다⁽⁸⁾. 앞서 잠깐 소개한 바와 같이, 기존의 열용사 코팅과는 달리, 고온의 열원에 의한 열 에너지 보다는 초음속 가스에 의해 가속된 입자의 운동 에너지가 충돌 입자와 모재의 소성 변형을 유도하여, 계면의 단열 온도 상승에 의한 접합을 형성하는 신개념 코팅 기술이다.

본 장에서는 저온분사 공정의 원리 및 기술적 특징을 소개하고자 한다.

2.2.1 저온분사 공정

Pressure booster와 gas heater에 의해 형성된 고온/고압의 process gas(N₂, He, air, or mixing gas)가 Fig. 9에 도시된 바와 같이, 분말 송급장치로부터 분말을 이송하는 carrier gas(N₂)와 스프레이 건 입구에서 서로 만나 HVOF 공정에서와 같이 de-Laval 수렴/발산 형태의 노즐을 통과하면서 초음속 가스를 형성한다. 이때, 가스와 분말 간의 운동량 전달에 의해, 분말은 초고속(300-1200 ms⁻¹)으로 가속되고, 노즐 출구에서 가스의 급속 팽창으로 인해, 온도가 급감하여, 비행입자의 온도 또한 융점 이하의 상온에 가까운 값을 갖게 된다⁽⁸⁻¹²⁾. 따라서, 기존의 열용사 공정과는 달리,

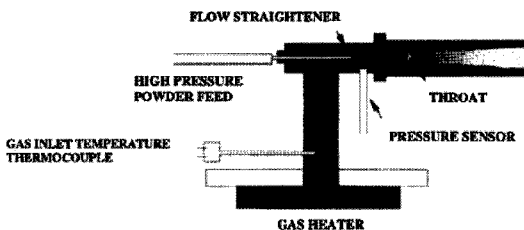


Fig. 9 Sketch of kinetic spray gun⁽⁹⁾

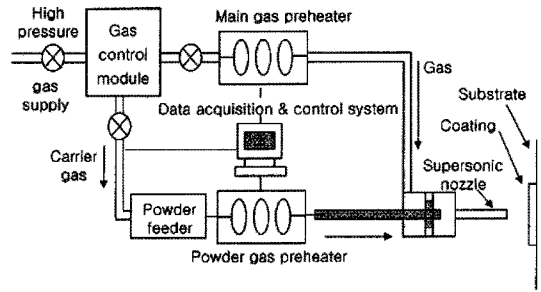


Fig. 10 Sketch of kinetic spray gun⁽⁹⁾

고온 대기 환경에서 발생할 수 있는 산화 및 상변태의 영향을 최소화할 수 있는 장점을 지닌다. 일반적으로 같은 압력 조건에서 가스 속도의 증대를 위해 가스만을 예열하는데, 저온분사 공정으로는 어렵다고 인식되는 초경이나 벌크 비정질 합금 같은 인성이 부족한 소재 코팅 연구를 위하여, Fig. 10에서와 같이 분말 예열 장치(powder preheating)를 추가로 도입하여 사용하기도 한다.

또한, 열용사 코팅과는 달리, 짧은 분사 거리(5-30 mm)를 사용하고, 작은 분사 bead 폭(5-10 mm)을 갖기 때문에, 정밀 부품 및 파이프 내경 코팅에 용이하다. 사용 분말의 크기는 1-50 μm 정도이고, 최근에는 200 μm 까지 가능하다고 보고되었다. Fig. 11에서와 같이, 다양한 순금속 및 합금, 금속-세라믹계 복합재 및 나노소재 초경 합금의 코팅이 가능하고, 미세조직을 통해, 매우 치밀한 코팅이 형성되는 것을 확인할 수 있다.

2.2.2 저온분사의 적층 기구

저온분사(Kinetic spray) 코팅은 말 그대로 저온에서 비행입자의 운동 에너지가 초고속 충돌에 따른고 변형률(최대 10⁹ s⁻¹) 소성 변형에 의한 변형 에너지로 변환되고, 이 에너지는 매우 짧은 접촉 시간(10⁻⁸-10⁻⁷ s)으로 인해, 입자의 내부 열 에너지로 축적되어, 충돌 계면의 단열 온도 상승을 유발한다. 이 때, 계면에서의 변형 및 온도가 비정상적으로 상승함과 동시에 계면응력이 붕괴되는 단열 소성 불안정(adiabatic shear instability) 현상⁽¹⁻⁵⁾이 나타나는데, 이에 따른 열적 활성화 반응이 계면접합을 형성하는 접합 에너지로 작용하여, 이 에너지가 반발 에너지 보다 클 때, 성공적인 접합이 가능해 진다⁽¹³⁾. 이러한 재료의 소성 불안정의 개시가 접합이 가능한 입계속도의 산출 근거가 되며, 재료의 고유물성 및 고변형을 하에서의 열-기계적 특성의 영향을 받는다^(1, 4, 5).

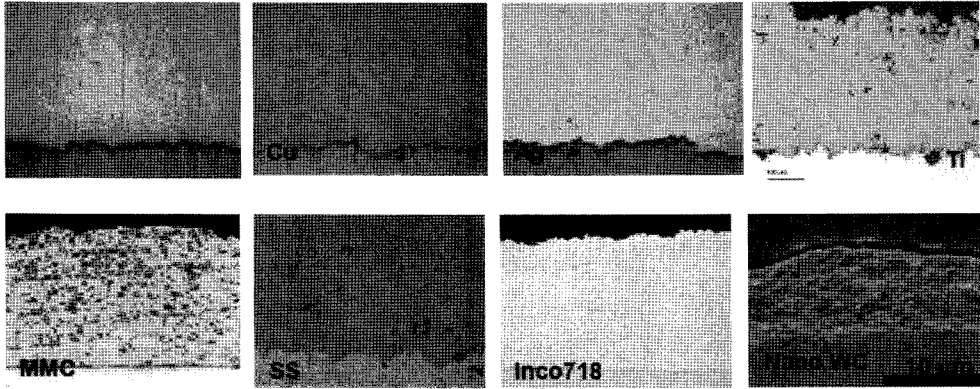


Fig. 11 Microstructures of kinetic sprayed coatings⁽¹⁴⁾

3. 산업적 응용 분야

3.1 열용사 코팅

열용사 코팅은 내마모, 내부식, 내열 코팅 등 다양한 산업 분야의 기능적 요구에 부응하여 폭넓게 적용되고 있다. 열용사 코팅의 가장 높은 비율을 차지하고 있는 분야는 단연 항공 분야인데, 터빈 부품의 thermal barrier coating(TBC)이 각광을 받아왔다. 이것은 고온 환경에서 발생할 수 있는 hot corrosion 및 고온 산화를 막기 위한 것이 주 목적이다. 코팅은 내구성 및 기능 향상을 위해, duplex 구조를 가지며, 탑코트 재료로는 zirconia-oxide (PSZ)과 같은 세라믹 계열이 주로 사용되고, 본드코트 재료로는 우수한 내산화성을 지닌 NiCrAlY와 같은 금속이 쓰인다⁽¹⁵⁾.

이 밖에도 Fig. 12에 도시된 바와 같이, 자동차 분야, 내부식 분야, 내마모 분야, 유리, 제지, 치과 의료 분야 등에 다양하게 적용되고 있다.

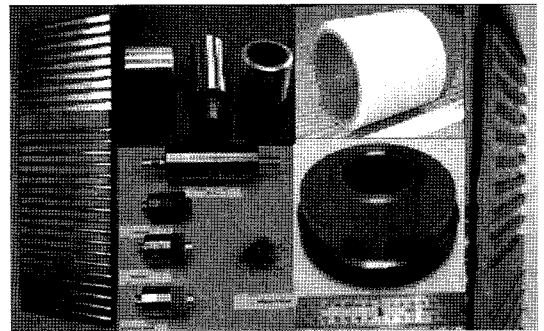


Fig. 13 Kinetic spray produced bulk forms⁽¹⁴⁾

3.2 저온분사 코팅

저온분사 코팅은 2003년에 독일에서 최초로 PC의 heat sink에 적용하였다. 후막 코팅 형성이 가능하고, Fig. 13에서와 같이, 파이프 외내경 코팅뿐 아니라, 터타늄 등의 bulk forming과 같은 near net shape(NNS) 코팅⁽¹⁶⁾ 또한 가능하다. 벌크 비정질 합금의 내마모 및 내부식 코팅^(17, 18) 및 WC-Co와 같은 초경 합금(cermet)의 내마모 코팅^(19, 20) 역시 주목할만한 활용 분야이다. 다이아몬드와 금속분말의 복합 분말 코팅을 통한 공구 휠의 제조⁽²¹⁾ 방법은 기존의 소결공정의 대체 공정으로 개발되고 있다. 금속-탄소나노튜브(CNT)의 MMC(Metal Matrix Composite) 코팅⁽²²⁾은 기계적, 전기적 특성을 향상시킬 수 있는 분야로 대두되고 있으며, 손상 금형의 보수를 위한 코팅⁽²³⁾ 및 보수용접 분야도 조업의 생산성 향상을 위한 적용 잠재 가능성을 보여주고 있다.

바이오 분야에서는 Ti-6Al-4V와 HA(Hydroxyapatite) 등의 코팅⁽²⁴⁾을 통해, 생체 재료에 활용하려는 시도가 이루어지고 있으며, 심지어는 유리나 세라믹 기관 등에도 코팅이 가능하다.

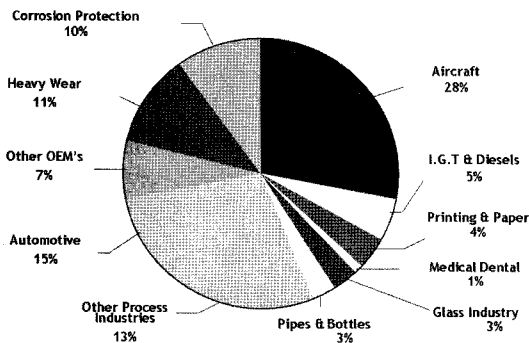


Fig. 12 Thermal spray coating in Euro-market

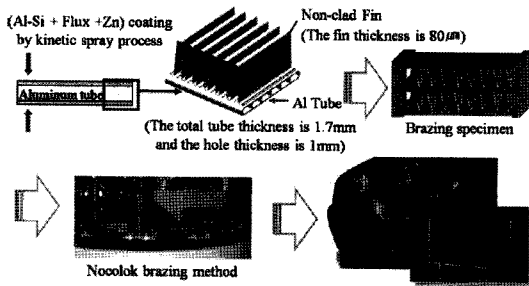


Fig. 13 Kinetic spray produced bulk forms⁽¹⁴⁾

이 밖에, 미국을 중심으로 한 저온분사 기술 선진국에서는 자동차 부품적용에 관심을 두고 있다. 현재 미국 자동차 회사 및 부품 회사에서 저온분사 기술을 이용한 가능한 적용처로 소개하고 있는 분야는 Fig. 14에 도시한 바와 같이 자동차 condenser 부품이다. 현재 국내 자동차 부품 회사에서 제작하는 자동차 컨덴서는 알루미늄 합금 모재에 알루미늄 합금 냉각핀을 붙이기 위하여 브레이징 공법을 사용하고 있는데, 이 공법은 클래딩한 냉각핀을 가공해야 하는 이중 공정이기 때문에, 저온분사 공정을 통한 공정 단축, 자동화 및 생산성 향상 목적으로 연구 개발이 일부 완료되었으며⁽²⁵⁾, 현재 기술 이전을 준비하고 있는 단계에 있다.

이와 같이, 저온분사 코팅 기술은 IT, BT, ET, ST 등의 전 분야에 걸쳐 그 활용 분야가 무궁무진하며, 공정 및 장비의 연구 개발 및 개선을 통해, 본 기술의 상용화 및 실용화의 실현이 머지않아 가능할 것으로 기대한다.

4. 결 론

본 기술해설에서는 스프레이 코팅 기술을 크게 열용사와 저온분사 공정으로 나누어 소개하였고, 각 공정의 적층원리 및 기술적 특징을 설명하였다. 열용사 공정은 100년 넘게 사용되어 온 기술로서, 플라즈마, 플레임, 아크 등과 같은 고온의 열원에 의한 열 에너지를 입자적층에 이용하며, 고온 대기 환경에서 발생하는 재료의 산화 및 탄화와 같은 단점에도 불구하고, TBC 코팅 등과 같은 내마모, 내부식, 내열 코팅 분야에 폭넓게 활용되고 있다.

저온분사 공정 기술은 이제 약 10년 정도 알려진 신생 기술로서, 초음속 가스에 의해 가속된 비행입자의 운동 에너지가 주로 적층에 이용되며, 열용사에 비해 우수한 코팅 특성을 지니기 때문에 자동차 부품 분야뿐 아

니라, 바이오 분야와 같은 고품위, 고품질 코팅에 적용될 수 있다. 앞으로 공정 및 장비의 획기적인 개선을 통해, 상용화의 기술적인 걸림들을 제거함으로써, 기존의 코팅 공정을 대체할 수 있는 차세대 신 코팅 기술로서 자리매김할 것으로 전망한다.

후 기

이 논문은 2006년도 정부(과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2006-02289).

참고문헌

- (1) H. Assadi, F. Gärtner, T. Stoltenhoff and H. Kreye, "Bonding mechanism in cold spraying", *Acta Mater.*, Vol. 51, 2003, pp. 4379-4394.
- (2) M. Grujicic, J.R. Saylor, D.E. Beasley, W.S. DeRosset and D. Helfritch, "Computational analysis of the interfacial bonding between feed-powder particles and the substrate in the cold-gas dynamic spray process", *Appl. Surf. Sci.*, Vol. 219, 2003, pp. 211-227.
- (3) M. Grujicic, C.L. Zhao, W. S. DeRosset and D. Helfritch, "Adiabatic shear instability based mechanism for particle/substrate bonding in the cold-gas dynamic-spray process", *Mater. Design*, Vol. 25, 2004, pp. 681-688.
- (4) T. Schmidt, F. Gärtner, H. Assadi and H. Kreye, "Development of a generalized parameter window for cold spray deposition", *Acta Mater.*, Vol. 54, 2006, pp. 729-742.
- (5) G. Bae, Y. Xiong, S. Kumar, K. Kang and C. Lee, "General aspects of interface bonding in kinetic sprayed coatings", *Acta Mater.*, Vol. 56, 2008, pp. 4858-4868.
- (6) The science and engineering of the thermal spray coating, Lech. Pawlowski, 1995, pp. 1-67.
- (7) Plasma-spray coating principles and applications, Robert B. Heimann, pp. 1-25.
- (8) A. Papyrin, "Cold spray technology", *Advanced Materials & Processes*, 2001, pp. 49-51.
- (9) 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. Pil-

- sner, R.C. McCune and K. J. Barnett, *Surf Coat Technol.*, Vol. 111, 1999, pp. 62~71.
- (9) A. P. Alkimov, V. F. Kosarev, S. V. Klinkov, "The features of cold spray nozzle design", *J. of Thermal Spray Technol.*, Vol. 10, 2001, pp. 373~381.
- (10) 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, pp. 423~431.
- (11) J. W. Wu, H. Y. Fang, S. H. Yoon, H. J. Kim and C. Lee, "Measurement of particle velocity and characterization of deposition in aluminum alloy kinetic spraying process", *Appl. Surf. Sci.*, Vol. 252, 2005, pp. 1368~1377.
- (12) J. W. Wu, H. Y. Fang, S. H. Yoon, H. J. Kim and C. Lee, "The rebound phenomenon in kinetic spraying deposition", *Scripta Mater.*, Vol. 54, 2006, pp. 665~669.
- (13) J. Karthikeyan, "Cold spray technology: International status and USA efforts", *ASB Industries, Inc.*, 2004, pp. 5.
- (14) H. S. Choi, B. H. Yoon, H. J. Kim and C. Lee, "Isothermal oxidation of air plasma spray NiCrAlY bond coatings", *Surf. Coat. Technol.*, Vol. 150, 2002, pp. 297~308.
- (15) M. F. Smith, J. E. Brockmann, R. C. Dykhuizen, D. L. Gilmore, R. A. Neiser, T. J. Roemer, "Cold spray direct fabrication - high rate, solid state, material consolidation", *Materials Research Society Symposium Process*, Vol. 542, 1999, pp. 65~76.
- (16) H. S. Choi, S. H. Yoon, G. Y. Kim, H. Jo and C. Lee, "Phase evolutions of bulk amorphous NiTiZrSiSn feedstock during thermal and kinetic spraying processes," *Scripta Mater.*, Vol. 53, 2005, pp. 125~130.
- (17) S. H. Yoon, H. J. Kim and C. Lee, "Deposition behavior of bulk amorphous NiTiZrSiSn according to the kinetic and thermal energy levels in the kinetic spraying process", *Surf. Coat. Technol.*, Vol. 200, 2006, pp. 6022~6029.
- (18) H. J. Kim, C. Lee, S. Y. Hwang, "Superhard nano WC-12%Co coating by cold spray deposition", *Mater. Sci. Eng. A*, Vol. 391, 2005, pp. 243~248.
- (19) H. J. Kim, C. Lee and S. Y. Hwang, "Fabrication of WC-Co coatings by cold spray deposition", *Surf. Coat. Technol.*, Vol. 191, 2005, pp. 335~340.
- (20) S. M. Shin, Y. Xiong, Y. G. Ji, H. J. Kim and C. Lee, "The influence of process parameters on deposition characteristics of a soft/hard composite coating in kinetic spray process", *Appl. Surf. Sci.*, Vol. 254, 2008, pp. 2269~2275.
- (21) S. R. Bakshi, V. Singh, K. Balani, D. G. McGartney, S. Seal and A. Agarwal, "Carbon nanotube reinforced aluminum composite coating via cold spraying", *Surf. Coat. Technol.*, Vol. 202, 2008, pp. 5162~5169.
- (22) J. C. Lee, H. J. Kang, W. S. Chu, S. H. Ahn, "Repair of damaged mold surface by cold-spray method", *CIRP Annals-Manufact. Technol.*, Vol. 56, 2007, pp. 577~580.
- (23) Technical trends, "New opportunities to use cold spray process for applying additive features to titanium alloys," Elsevier Ltd., 2006, pp. 0026~0657.
- (24) S. H. Yoon, H. J. Kim and C. Lee, "Fabrication of automotive heat exchanger using kinetic spraying process", *Surf. Coat. Technol.*, Vol. 201, 2007, pp. 9524~9532.