

## 탄소 나노튜브 알루미늄 복합재료 저온 분사 코팅의 적층 거동 및 특성

강기철\* · Yuming Xiong\* · 이창희\*

\*한양대학교 신소재공학과

## Deposition Behavior and Properties of Carbon Nanotube Aluminum Composite Coatings in Kinetic Spraying Process

Kicheol Kang\*, Yuming Xiong\* and Changhee Lee\*

\*Kinetic Spray Coating Laboratory (NRL), Division of Materials Science &amp; Engineering, Hanyang University, 17 Hangdang-dong, Seongdong-ku, Seoul, 133-791, Korea

\*Corresponding author ; chlee@hanyang.ac.kr

(Received November 19, 2007 ; Received February 15, 2008 ; Accepted October 7, 2008)

## Abstract

Carbon nanotube (CNT) aluminum composite coatings were built up through kinetic spraying process. Deposition behavior of CNT aluminum composite on an aluminum 1050 alloy substrate was analyzed based on deposition mechanism of kinetic spraying. The microstructure of CNT aluminum composite coating were observed and analyzed. Also, the electrical resistivity, bond strength and micro-hardness of the CNT aluminum composite coatings were measured and compared to kinetic sprayed aluminum coatings. The CNT aluminum composite coatings have a dense structure with low porosity. Compared to kinetic sprayed aluminum coating, the CNT aluminum composite coatings present lower electrical resistivity and higher micro-hardness due to high electrical conductivity and dispersion hardening effects of CNTs.

Key Words : Carbon nanotube aluminum composite, Kinetic spraying, Deposition behavior, Electrical and mechanical properties

## 1. 서론

$$\left(\frac{A}{A^*}\right)^2 = \frac{1}{M^2} \left[ \frac{2}{\gamma+1} \left( 1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2 \right) \right]^{(\gamma+1)/(\gamma-1)} \quad (1)$$

저온 분사 (kinetic spraying 또는 cold gas dynamic spraying) 공정은 마이크론 크기의 미세한 입자의 고상 집합을 기반으로 하는 코팅 기술이다. 저온 분사 공정에서는 질소 또는 헬륨 기체에 고압을 가하여 가속시킨다. 또한 기체는 수렴-발산 노즐 (converge-diverge nozzle)의 수렴부를 통과하면서 압축되고, 발산부를 통과하면서 압축 기체는 급격하게 팽창하게 되며, 팽창에 의해 가스의 유동 속도는 초음속으로 가속된다. 발산부에서의 기체 팽창에 따른 기체 속도 상승은 다음의 노즐 단면적과 기체의 속도 관계식으로 나타난다<sup>1,2)</sup>.

$A$ 는 노즐 출구의 단면적,  $A^*$ 는 노즐 수렴부의 최소 단면적,  $M$ 은 초음속 기체의 마하수 (Mach number) 그리고  $\gamma$ 는 기체의 비열 (ratio of specific heat) 을 각각 나타낸다. 실제, 입자는 초음속의 기체 유동장 내에 장입되어 기체의 끄는 힘 (drag force)에 의해서 가속된다. Alkhimov et al.<sup>3)</sup>은 층류를 형성하는 기체의 끄는 힘 구형의 입자가 가속되는 경우에 입자의 속도에 대한 저온 분사 공정에서의 경험적 방정식을 다음과 같이 제시하였다.

$$v_p = \frac{v_g}{1 + 0.85 \sqrt{\frac{D}{x} \frac{\rho_p v_g^2}{P_0}}} \quad (2)$$

$v_p$ 는 입자 속도,  $v_g$ 는 질소 가스 속도,  $P_0$ 는 질소 가스 압력,  $\rho_p$ 는 입자의 밀도,  $D$ 는 입자의 직경 그리고  $x$ 는 분사 방향에 평행한 축 상의 위치를 각각 나타낸다. 입자의 속도는 기체의 속도에 선형적으로 비례하여 증가하며, 저온 분사 공정에서 입자의 비행 속도는 입자의 밀도, 크기, 형상 등의 입자 조건과 사용 기체의 종류, 온도, 압력 등의 공정 조건에 따라 500-1200 m/s의 범위를 가진다<sup>3,4</sup>. 입자는 열용사 (thermal spraying)와 비교하여 현저히 낮은 온도에서 용융되지 않고 고체 상태에서 모재와 충돌하여 높은 변형 속도 (strain rate) 하에서 극심한 소성 변형을 겪게 된다. 공정 조건에 따라 변형 속도는  $0.5 \times 10^9 \text{ s}^{-1}$ 까지 상승한다<sup>4,5</sup>. 이러한 높은 변형 속도 하에서는, 소성 변형으로 인하여 발생하는 열 에너지가 외부로 전달되지 못하고, 단열 상태 (adiabatic state)로 변형하는 입자 내에 축적되어 입자의 열적 연화 (thermal softening)을 유도하며, 입자와 모재의 계면 상에 단열 전단 불안정 (adiabatic shear instability)을 발생시킨다<sup>4,7</sup>. 저온 분사에서 입자의 고상 접합 기구는 단열 전단 불안정 (adiabatic shear instability)에 의한 계면부의 온도 상승에 기인하는 것으로 알려져 있다<sup>4,7</sup>. 저온 분사 공정은 공정 중 부가적인 산화와 상변태 (phase transformation) 없이 입자의 물리적, 기계적 특성을 보존하며 코팅층을 형성할 수 있는 특징을 가지고 있다.

본 연구에서는 탄소 나노튜브 (carbon nanotube, CNT) 알루미늄 복합재료를 저온 분사 공정을 이용하여 코팅을 형성하였다. 현재까지 CNT는 hydroxyapatite와 같은 세라믹 또는 에폭시 등의 Polymer 등 다양한 재료와 복합재료로 형성되었다<sup>8-10</sup>. 그리고 CNT 복합재료는 많은 연구를 통하여 평가되어왔으며 CNT 복합재료는 높은 전기 및 열 전도성과 기계적 성질을 가지는 것으로 보고되었다<sup>8-11</sup>. 하지만, CNT 복합재료가 우수한 성질을 가지는 것에 반하여 CNT 복합재료의 성형은 현재까지 기술적인 어려움이 있다. 이번 연구에서는 CNT의 체적 분율이 각각 3%, 1%인 CNT 알루미늄 복합재료가 사용되어 저온 분사를 통하여 이들 재료의 코팅을 형성하였다. 그리고 CNT 알루미늄 복합재료 코팅의 CNT 체적 분율에 따른 적층 거동과 미세 조직을 관찰, 분석하였으며, 또한, CNT 알루미늄 복합재료 코팅의 전기 및 기계적 특성이 평가되고 분석되었다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 사용 분말

본 연구에는 CNT 알루미늄 복합재료 분말 (ACN Technology Co.)과 알루미늄 분말 (AL-104, Praxair)이 사용되었다. CNT 알루미늄 복합재료 분말의 경우 기지 내 CNT가 균일하게 분포하고 있으며, 알루미늄 내 CNT 체적 분율이 각각 3%, 1%이다. Fig. 1은 각 CNT 알루미늄 복합재료 분말과 알루미늄 분말의 형상과 단면을 나타내고 있다. CNT 알루미늄 복합재료 분말은 모두 형상이 불균일하며, 분말의 표면이 매끄럽지 못하다. 그리고 분말의 크기 분포는 +20  $\mu\text{m}$ -100  $\mu\text{m}$ 이다. 반면 알루미늄 분말의 경우는 형상이 구형이며, 크기 분포는 +53  $\mu\text{m}$ -60  $\mu\text{m}$ 이다.

### 2.2 저온 분사 공정

본 연구에서는 현재 산업적으로 사용 가능하고 수렴-발산 (converge-diverge) 형태의 텅스텐카바이드 노즐 (nozzle)이 장착된 저온 분사 장비 (KINETIC 3000, Cold Gas Technology)가 사용되었다. 사용된 저온 분사 장비와 자세한 코팅 공정은 다음 참고 문헌에 설명되어 있다<sup>3,4,6,7</sup>. 본 연구에서 이용된 저온 분사 공정 조건은 Table 1에 정리되어 있다. 각 분말의 비행 속도에 따른 적층 거동을 관찰하기 위하여 3 가지

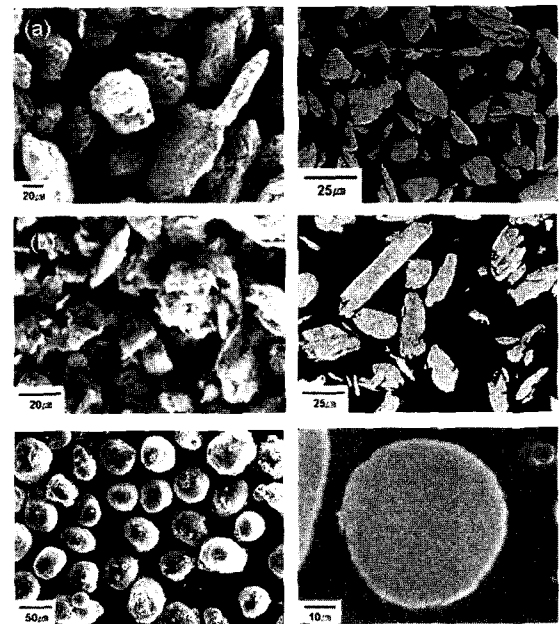


Fig. 1 SEM micrographs: powder morphology and cross-section, (a) aluminum/CNT 3% composite, (b) aluminum/CNT 1% composite, (c) aluminum

**Table 2** Kinetic spraying process parameters

Process conditions	Process gas type	Process gas temperature (°C)	Process gas pressure (MPa)
C <sub>1</sub>	Nitrogen	500	2.5
C <sub>2</sub>	Helium	400	1.2
C <sub>3</sub>	Helium	400	2.0

공정 조건을 이용하였다. 공정 조건 C<sub>1</sub>에서는 공정 가스로 질소를 사용하여 헬륨을 공정 가스로 사용한 공정 조건 C<sub>2</sub>, C<sub>3</sub>와 비교하여 상대적으로 낮은 입자 속도를 생성하며, 공정 조건 C<sub>3</sub>는 C<sub>2</sub>보다 높은 공정 압력을 사용하여 C<sub>2</sub>보다 높은 입자 속도를 생성한다. 이 연구에서는 분말 송급 가스로는 질소를 사용하였으며 공정 가스 유량의 8%로 설정하였다. 코팅 거리 (출구에서 모재까지의 거리, stand-off distance)는 30 mm로 고정하였다. 분말 송급율 (feed rate)는 4 g/min으로 설정하였다. 본 연구에 사용한 모재는 알루미늄 1050 합금이며, 3 mm 두께의 판재로서 저온 분사 실험 이전에 연마하여 표면 조도를 최소화하였다. 스프레이 건의 이동 속도는 80 mm/s 설정하여 모재 상에 전면 코팅을 수행하였다.

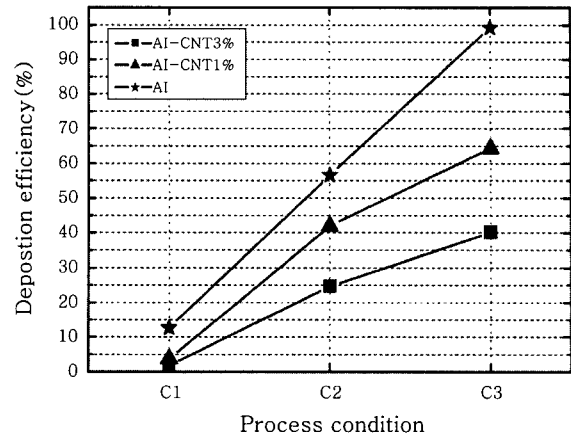
### 2.3 코팅 조직 분석 및 특성 평가

본 연구에서는 SEM (scanning electron microscope: JAM5600, JEOL)와 OM (optical microscope: BX60M, Olympus)를 이용하여 코팅의 미세 조직이 관찰되었다. 코팅의 미세 조직을 관찰하기 위해서 코팅의 단면을 미세 연마 (0.03 μm alumina)하고, Kroll's reagent (3 ml HF + 6 ml HNO<sub>3</sub> + 100 ml H<sub>2</sub>O)를 사용하여 코팅을 에칭 하였다. 코팅의 전기적 특성을 평가하기 위해서 코팅의 전기 비저항을 4-point probe를 사용하여 상온에서 측정하였다. 그리고 코팅의 기계적 특성 평가로서, 코팅의 접합 강도 (bond strength)는 pull-out tester (Romulus, Quad group)를 사용하여 측정되었다. 미소 경도 측정기 (HMV-2, Shimadzu)를 이용하여 코팅의 미소 경도가 측정되었다. 코팅의 미소 경도는 연마된 코팅의 표면을 비커스 (Vickers) 압입자로 980.7 mN의 하중을 가하여 10 초간 압입하여 측정하였다.

## 3. 실험 결과 및 고찰

### 3.1 적층 거동 및 미세 조직

Fig. 2는 각 분말의 각 공정 조건에서 코팅의 적층

**Fig. 2** Deposition efficiency at each process condition

효율을 나타내고 있다. 저온 분사에서 적층 효율은 분사된 총 입자의 질량에 대한 모재 상에 형성된 코팅의 질량 비율로 정의된다. 적층 효율은 동일한 분말에 대해서 공정 조건이 C<sub>1</sub>에서 C<sub>3</sub>로 변해감에 따라 선형적으로 증가하고 있음을 알 수 있다. 그리고 같은 공정 조건에서 CNT의 체적 분율이 증가함에 따라 적층 효율은 감소함을 알 수 있다. 저온 분사에서 입자의 적층은 입자의 충돌 중 소성 변형 과정에서 발생하는 열 에너지에 의한 접합 계면부의 온도 상승과 이로 인한 계면부의 원자 간의 접합을 통해 이루어진다. 실제, 저온 분사 공정에서 접합 계면부 원자 중 접합을 형성하는 원자의 비율은 다음 식을 통해 나타난다<sup>13,14</sup>.

$$a\% = 1 - \exp\left\{-v_c \exp\left[\frac{-E_a}{kT_c}\right]\right\} \quad (3)$$

본 식에서  $v$ ,  $t_c$ ,  $E_a$ ,  $T_c$  그리고  $k$ 는 각각 결정 내 원자 Eigen-oscillation 진동수, 접촉 시간, 접합에 필요한 활성화 에너지, 계면부 온도, 볼츠만 상수 (Boltzmann constant)를 의미한다. 본 식에서  $v$ ,  $E_a$  그리고  $k$ 는 재료의 고유 상수이고,  $t_c$ 를 일정하다고 가정할 경우, 접합을 형성하는 원자 비율은 접촉 온도에 의해서 결정되며, 온도가 상승할수록 증가한다. 저온 분사에서 입자의 접합은 입자가 임계 속도 (critical velocity) 이상에서 충돌할 경우, 단일 전단 불안정을 발생하여, 계면부의 소성 변형률을 급격히 증가시킴으로써 계면부에 접합에 요구되는 충분한 열에너지를 공급하게 하여 접합을 형성한다<sup>3-5</sup>). 저온 분사에서의 임계 속도는 다음 식으로 나타내어진다<sup>4</sup>.

$$v_{cr} = 667 - 14\rho + 0.08T_m + 0.1\sigma_u - 0.4T, \quad (4)$$

본 식에서  $\rho$  는 밀도,  $T_m$  은 녹는점,  $\alpha_n$  는 인장 강도,  $T_i$  는 초기 온도를 각각 나타낸다. 밀도, 녹는점 그리고 초기 온도가 같을 경우, 재료의 인장 강도가 증가할수록 입계 속도는 증가함을 알 수 있다. 본 연구에서 사용된 CNT 알루미늄 복합재료와 알루미늄 분말의 밀도, 녹는점 그리고 초기 온도가 유사하며, 알루미늄 기지 내의 CNT의 분산 강화에 의해 CNT의 분율에 따라 입자의 인장 강도는 증가하여, 높은 입계 속도를 가지게 된다. 따라서, 같은 공정 조건에서 CNT의 분율이 증가함에 따라 적층 효율이 감소하는 것은 CNT 분율에 따른 입계 속도 차이에 의한 것이다.

Fig. 3은 각 공정 조건에서 형성된 각 코팅의 단면을 보여준다. Fig. 2에 나타난 적층 효율의 증가에 따라 코팅의 두께가 증가하고 있음을 알 수 있다. Fig. 3 (a), (b), (c)는 공정 조건 C<sub>1</sub>에서 형성된 각 분말의 코팅 단면을 나타내고 있다. 공정 조건 C<sub>1</sub>에서 알루미늄은 평균 180  $\mu\text{m}$  두께의 코팅이 형성되었으나, CNT 알루미늄 복합재료 코팅의 경우, 공정 조건 C<sub>1</sub>에서 후막이 형성되지 않고, 코팅층이 불연속적으로 나타났다. 공정 조건 C<sub>2</sub>, C<sub>3</sub>에서 CNT 알루미늄 복합재료 코팅은 후막을 형성하였다. Fig. 3 (d)-(i)의 코팅은 모두 기공도가 1% 이하로 조밀 (dense)한 코팅층을 형성하고 있다. 코팅층과 모재 간 계면을 살펴보면 계면은 기공

이 없이 치밀한 접합을 형성하고 있으며, 계면은 직선을 형성하지 않고 코팅층과 모재가 서로 맞물려 있는 것을 관찰할 수 있다. 이것은 입자가 모재 상에 충돌할 때, 입자와 함께 모재에서도 변형이 발생한다. 이러한 코팅층과 모재 간의 interlocking은 코팅층과 모재 간의 접합 강도를 높이는 요소가 된다. Fig. 4는 공정 조건 C<sub>3</sub>에서 형성된 각 코팅의 에칭된 단면을 나타내고 있다.

Fig. 4 (a), (b), (c)를 통하여 입자 간 계면은 입자 간 접합을 통하여 치밀하게 형성되었음을 확인할 수 있다. 저온 분사 공정에서 입자는 충돌 시 극심한 변형을 거치면서 out flow jet을 형성한다<sup>4-7</sup>. Fig. 4 (c)에서 변형된 입자의 out flow jet을 관찰할 수 있으며, 이러한 입자의 out flow jet은 아래, 위의 적층 입자 간 interlocking을 형성하여 코팅의 미세 조직을 더욱 치밀하게 한다. 동일 공정 조건 내에서도 CNT 분율이 감소함에 따라 충돌 시 변형율이 높게 되므로 out-flow jet의 발생량은 증가한다.

### 3.2 코팅 특성 평가

Fig. 5는 공정 조건 C<sub>3</sub>에서 형성된 각 코팅의 전기 비저항 측정 결과를 나타내고 있다. CNT의 체적 비율

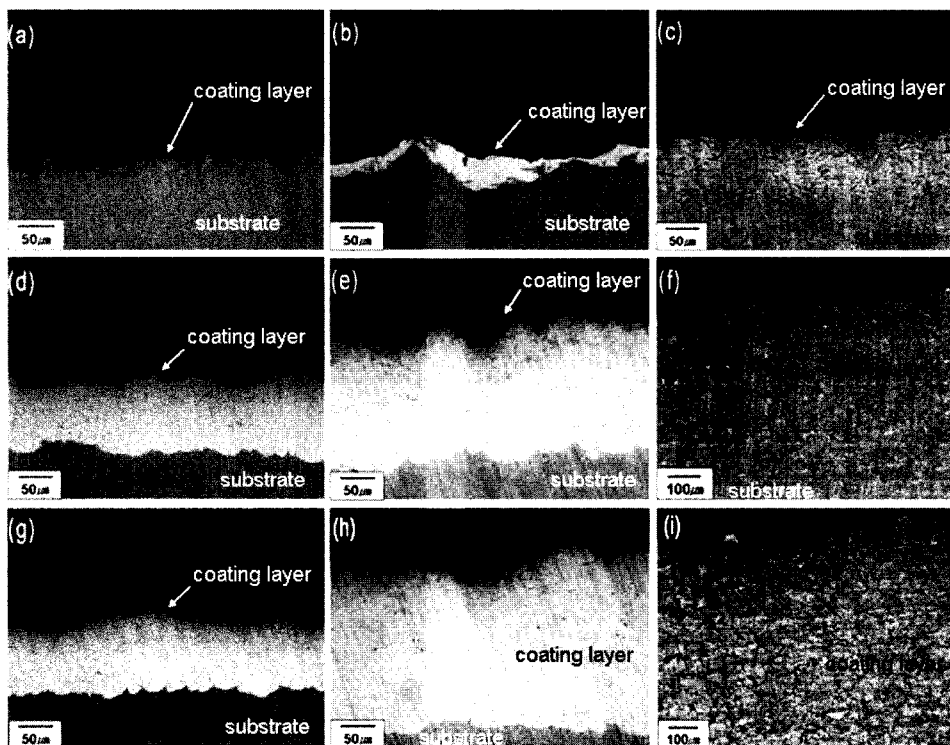
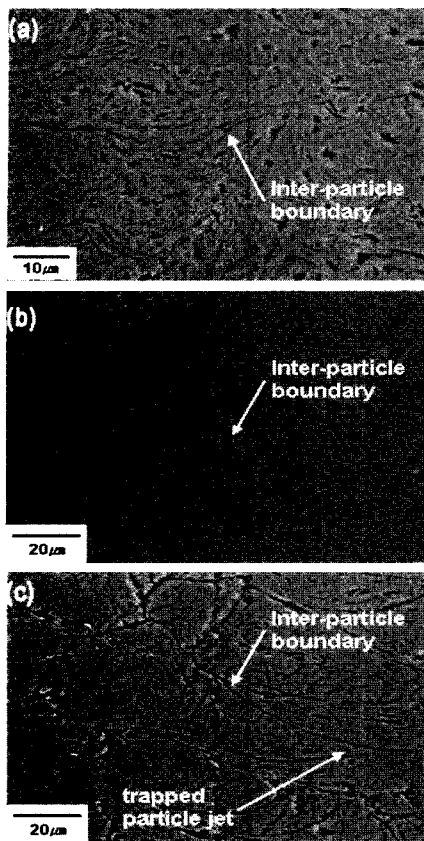
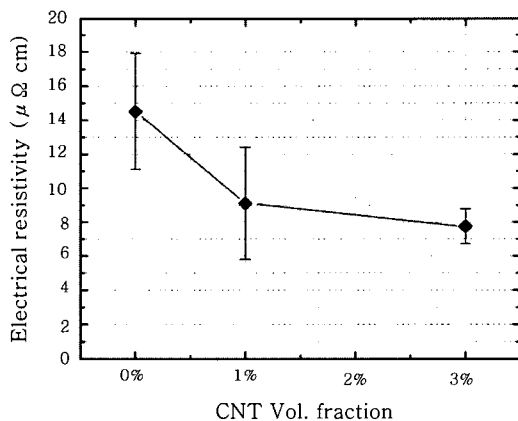


Fig. 3 OM micrographs: cross-section of coating, (a), (d), (g) as-sprayed aluminum/CNT Vol. 3% coating sprayed at process condition C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub>, C<sub>3</sub>, (b), (e), (h) as-sprayed aluminum/CNT Vol. 1% coating sprayed at process condition C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub>, C<sub>3</sub>, (c), (f), (i) etched aluminum coating sprayed at process condition C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub>, C<sub>3</sub>



**Fig. 4** SEM micrographs: etched cross-section of coating sprayed at process condition C<sub>3</sub> (a) aluminum/CNT Vol. 3 % coating, (b) aluminum/CNT Vol. 1 % coating, (c) aluminum coating



**Fig. 5** Electrical resistivity of coatings sprayed at process condition C<sub>3</sub>

이 증가함에 따라 코팅의 전기 비저항은 선형적으로 감소한다. 금속의 전기 비저항은 측정 금속의 미세 조직과 금속 내 결함에 의해서 크게 영향을 받게 된다. 저온 분사를 통해 형성된 코팅의 경우, 입자 내부의 결정립계 (grain-boundary), 입자 간 계면 그리고 전위

등의 결함을 내포하고 있다. 저온 분사를 통하여 형성된 CNT 알루미늄 복합재료 코팅의 전기 비저항은 Mattiessen's rule을 따라서 다음 식으로 나타낼 수 있다<sup>15)</sup>.

$$\rho = \rho_0 + \Delta\rho_{gb} + \Delta\rho_{pb} + \Delta\rho_{CNT} + \Delta\rho_P + \Delta\rho_{dl} \quad (5)$$

본 식에서  $\rho_0$ 는 annealing을 통하여 조대한 결정립 (coarse grain)을 가지는 알루미늄의 전기 비저항이다.  $\Delta\rho_{gb}$ 는 결정립계에 의한 전기 비저항 증가,  $\Delta\rho_{pb}$ 는 입자 간 계면에 의한 전기 비저항 증가,  $\Delta\rho_{CNT}$ 는 CNT에 의한 전기 비저항 감소,  $\Delta\rho_P$ 는 기공 (pore)에 의한 전기 비저항 증가 그리고  $\Delta\rho_{dl}$ 는 전위에 의한 전기 비저항 증가를 나타낸다. 저온 분사 중 적층 과정에서의 입자의 용융-응고 과정이나 상변태가 발생하지 않기 때문에, 입자의 결정립의 크기 변화는 발생하지 않는다. 따라서, 결정립계에 의한 코팅의 전기 비저항 증가는 사용 분말의 결정립 크기에 의해 결정된다. 저온 분사 코팅에서 입자 간 계면은 각 입자 간 결정 방향에 차이에 의하여 결정립계와 같은 결함을 형성한다. 그리고, Fig. 3, 4에서 보았듯이 코팅은 상당히 조밀하여, 1% 이하의 기공도를 가지므로, 기공에 의한 전기 비저항 증가는 무시할 수 있다. 저온 분사 공정 중 입자는 극심한 소성 변형을 겪으면서 전위 밀도가 적층 후 높게 증가한다<sup>16)</sup>. 전위 밀도의 증가로 인해 저온 분사 코팅의 전기 비저항은 전위에 의해 증가하게 된다. Fig. 5에서 CNT 알루미늄 복합재료 코팅의 전기 비저항은 CNT 체적 분율이 3%, 1%일 경우 각각 7.8 μΩ·cm, 9.1 μΩ·cm이다. 그리고 알루미늄 코팅의 전기 비저항은 14.5 μΩ·cm이다. 알루미늄 코팅의 전기 비저항 값을 CNT 알루미늄 복합재료 코팅에 비하여 비교적 높은 값을 나타낸다. 이러한 코팅 내부의 CNT 분율에 따른 비저항 차이는 CNT의 높은 전기 전도도에 기인하여, CNT 분율 증가에 따라 전기 비저항이 감소하는 것이다. 하지만, 앞서 언급하였듯이, 전기 비저항은 코팅 내부의 결함에 크게 영향을 받게 되므로, 알루미늄과 CNT 알루미늄 복합재료의 결정립계, 전위 등의 차이에 의해 발생할 수 있다.

Fig. 6은 공정 조건 C<sub>2</sub>, C<sub>3</sub>에서 형성된 각 코팅의 접합 강도 측정 결과를 나타낸다. 모든 코팅의 파단 (fracture)은 코팅층 내부에서 발생하였다. 따라서 측정된 접합 강도는 코팅층 간 접합 강도 (cohesive bond strength)이다. Fig. 3에서 보았듯이, 코팅층과 모재의 계면은 상당히 치밀하게 형성되어 코팅층 간 접합 강도 (adhesive bond strength)가 코팅층

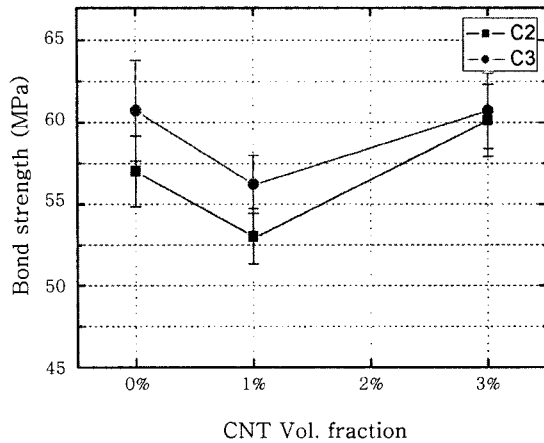


Fig. 6 Bond strength of coatings sprayed at process condition C<sub>2</sub>, C<sub>3</sub>

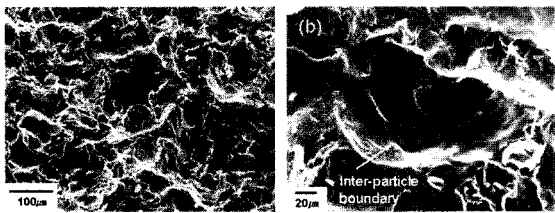


Fig. 7 SEM micrographs: fracture surface of aluminum CNT 1% composite coating sprayed at process condition C<sub>3</sub>

간 접합 강도보다 높게 된다. Fig. 7은 접합 강도 실험 후의 파단면을 보여주는 것으로 파단면에서 적층 입자가 떨어져나간 입자 간 계면을 관찰할 수 있다. 이것은 접합 강도 실험 중 코팅층에 가해지는 일축 인장 응력 (uniaxial tensile stress)이 주어짐에 따라, 코팅층 내부의 기공 또는 미세 기공에서 crack이 발생되기 시작하여 입자 내 결정립계 보다 상대적으로 결합 상태가 약한 입자 간 계면을 따라 crack이 전파되어 파단이 발생했기 때문이다. CNT 체적 분율이 1%인 코팅의 경우 접합 강도가 다른 코팅과 비교하여 상대적으로 낮게 나타나지만, 모든 코팅의 접합 강도가 53MPa 이상의 높은 접합 강도를 가지며, 접합 강도의 차이는 오차 범위에 포함된다고 할 수 있다. C<sub>3</sub>에서 형성 코팅의 접합 강도가 C<sub>2</sub>에서 형성된 코팅의 접합 강도보다 높게 나타나는데, 이것은 더 높은 속도에서 입자가 충돌하여 더 많은 변형을 겪게 됨에 따라, 입자 간 결합 상태도 더 치밀해지고, 입자 간의 interlocking도 강해지기 때문이다.

Fig. 8은 공정 조건 C<sub>2</sub>, C<sub>3</sub>에서 형성된 각 코팅의 미소 경도 측정 결과를 나타내고 있다. 동일 공정 조건에서, CNT 체적 분율이 증가함에 따라 미소 경도 값은 현저히 증가하고 있으며, 동일 재료의 코팅에 대하

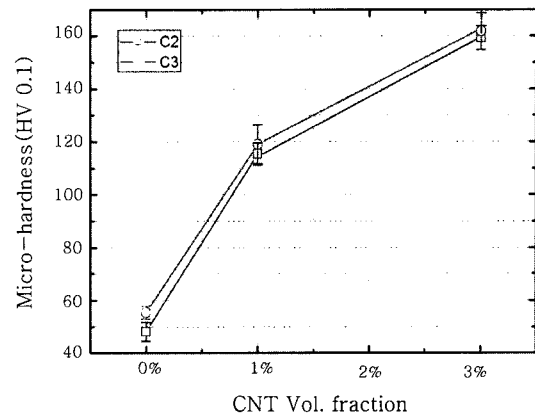


Fig. 8 Micro-hardness of coatings sprayed at process condition C<sub>2</sub>, C<sub>3</sub>

여, 공정 조건 C<sub>3</sub>에서 형성된 코팅의 미소 경도가 공정 조건 C<sub>2</sub>에서 형성된 코팅의 미소 경도보다 높게 나타난다. 저온 분사를 통하여 형성된 CNT 알루미늄 복합재료 코팅의 미소 경도는 다음 식과 같이 나타내어질 수 있다<sup>15)</sup>.

$$H = H_0 + \Delta H_{gb} + \Delta H_{CNT} + \Delta H_{sh} \quad (6)$$

$H_0$ 는 annealing을 통하여 조대한 결정립을 가지는 알루미늄의 경도이다.  $\Delta H_{gb}$ 는 결정립 크기에 기인하는 강화를 나타내며, 다음의 Hall-Petch 관계식을 통해 나타난다<sup>17)</sup>.

$$\Delta H_{gb} = K_H d^{-1/2} \quad (7)$$

여기서,  $K_H$ 는 Hall-Petch 상수이고,  $d$ 는 결정립의 직경이다.  $\Delta H_{CNT}$ 는 코팅 내부에 분산되어 있는 CNT에 의한 강화 효과를 나타낸다.  $\Delta H_{sh}$ 는 적층 과정 중의 소성 변형으로 인한 가공 경화를 나타낸다. 같은 공정 조건에서 분사되는 경우는 입자가 유사한 변형 과정을 거치게 되므로 가공 경화에 의한 강화는 모든 코팅에서 차이가 나지 않는다. 입자의 결정립 크기는 CNT 알루미늄 복합재료는 CNT 분율에 관계 없이 같은 결정립 크기를 가지므로 현저한 미소 경도 차이를 설명할 수 없다. 미소 경도 상의 차이는 알루미늄 기지 내에 CNT의 분산 강화 (dispersion hardening)에 의해 발생하는 것이다. Fig. 9는 분산 강화 기구에 대해 대략적으로 나타내고 있다. 소성 변형은 재료 내 전달되는 전단 응력 (shear stress)에 의한 전위의 이동을 통해 진행된다. 기지 내 CNT는 전위의 이동을 방해하고, 전위가 통과하면서 전위고리 (dislocation loop)를

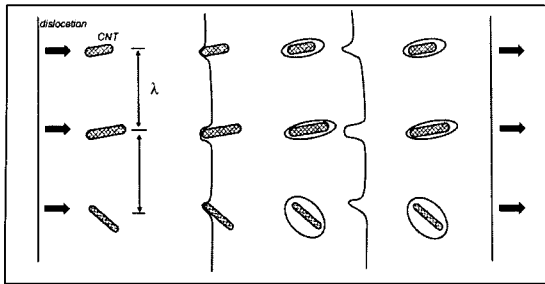


Fig. 9 Schematics of stages in passage of a dislocation between separated obstacles

형성하여 전위 이동에 필요한 전단 응력을 증가시킨다<sup>18)</sup>. CNT에 의한 강화는 Orowan-Ashby 방정식을 통해 다음과 같이 나타낼 수 있다<sup>18)</sup>.

$$\Delta\sigma = \frac{0.13Gb}{\lambda} \ln \frac{r}{b} \quad (8)$$

$G$ 는 탄성전단계수 (elastic shear modulus)이고,  $b$ 는 버거스 벡터 (burgers vector),  $r$ 은 기지 내 입자 크기,  $\lambda$ 는 입자 간의 거리이다. 코팅 내부의 CNT 분율이 증가함에 따라, CNT 간 거리  $\lambda$ 가 감소하여, 코팅은 강화되어 미소 경도 또한 증가하게 된다.

#### 4. 결 론

본 연구는 저온 분사 공정을 통하여 CNT 알루미늄 복합재료 코팅을 형성하여 알루미늄 코팅과 적층 거동, 미세 조직 그리고 전기 및 기계적 특성을 비교하였다. 저온 분사 공정을 통하여 CNT 알루미늄 복합재료로는 알루미늄과 비교하여 낮은 변형성 (deformability)를 가지는 것으로 인해 상대적으로 낮은 적층 효율 나타냈다. 하지만, 코팅층의 미세 조직은 낮은 기공도의 조밀한 조직을 형성하였다. CNT 알루미늄 복합재료의 전기 비저항은 CNT의 높은 전기 전도성에 기인하여 알루미늄 코팅과 비교하여 낮은 전기 비저항을 나타내었으며, CNT 분율 증가에 따라 전기 비저항은 감소하였다. CNT 알루미늄 복합재료 코팅과 모재는 치밀한 접합을 형성하여, 접합 강도 측정 결과 모든 코팅의 파단은 코팅 내부에서 발생하였으며, 높은 접합 강도를 보였다. 높은 공정 조건에서 적층 시 입자의 변형률도 크고, 적층 입자 간 interlocking이 강해져 접합 강도는 증가하였다. 미소 경도 측정 결과, CNT의 분산 강화 기구에 의해 코팅 내 CNT의 분율 증가에 따라 미소 경도는 현저히 증가하였다.

고, 적층 입자 간 interlocking이 강해져 접합 강도는 증가하였다. 미소 경도 측정 결과, CNT의 분산 강화 기구에 의해 코팅 내 CNT의 분율 증가에 따라 미소 경도는 현저히 증가하였다.

#### 5. 후 기

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

#### 참 고 문 헌

1. R.C. Dykhuizen, M.F. Smith : J. Therm. Spray Technol., **7** (2), 1998, 205-212
2. J. D. Anderson, Jr. : Modern compressive flow, McGraw-Hill, 1982, 127-136
3. J. Wu, H. G. Fang, S. Yoon, H. Kim, C. Lee : App. Sur. Sci., **252**, 2005, 1368-1377
4. H. Assadi, F. Gärtner, T. Stoltenhoff, H. Kreye : Acta Mater., **51**, 2003, 4379-4304
5. M. Grujicica, J.R. Saylor, D.E. Beasley, W.S. DeRossetb, D. Helfrich : App. Sur. Sci., **219**, 2003, 211-227
6. T. Schmidt, F. Gärtner, H. Assadi, H. Kreye : Acta Mater., **54**, 2006, 729-742
7. K. Kang, S. Yoon, Y. Ji. C. Lee : J. KWJS, **25**, 1997, 373-379 (in Korean)
8. P. Guo, X. Chen, X. Gao, H. Song, H. Shen : Compos. Sci. Technol., **67**, 2007, 3331-3337
9. J. T. Wescott, P. Kung, A. Maiti : Appl. Phys. Lett., **90**, 2007, 033116
10. K. Balani, Y. Chen, S. P. Harimkar, N. B. Dahotre, A. Agarwal : Acta Biomater., **3**, 2007, 944-951
11. L. Bokobza : Polymer, **48**, 2007, 4907-4920
12. K. Kanetoo, M. Tsurutaa, G. Sakaia, W.Y. Chob, Y. Ando : Synth. Met., **103**, 1999, 2543-2546
13. J. Wu, H.G. Fang, S. Yoon, H.J. Kim, C. Lee : Scripta Mater., **54**, 2006, 665-669
14. Y. V. Kurochkin, Y. N. Demin, S. I. Soldatenkov : Chem. & Petrol. Eng., **38**, 2002, 245-248
15. P. S. Phani, V. Vishnukanthan, G. Sundararajan : Acta Mater., **55**, 2007, 4741-4751
16. C. Borchers, F. Gärtner, T. Stoltenhoff, H. Kreye : Acta Mater., **53**, 2005, 2991-3000
17. R. E. Reed-Hill, R. Abbaschian : Physical metallurgy principles (3rd edition), 159-194
18. G. E. Dieter, Mechanical metallurgy (3rd edition), McGraw-Hill, 1988, 212-219