

초음속 저온분사법에 의해 적층된 알루미늄 층의 재료 물성

*이재철¹, 안성훈²

^{1,2} 서울대학교 기계항공공학부

Material properties of thick aluminum coating made by cold gas dynamic spray deposition

* Jae-Chul Lee¹ and Sung-Hoon Ahn²

^{1,2} School of Mechanical & Aerospace Engineering, Seoul National University

Key words : Cold gas dynamic spray, Deposition, Impact, Elastic modulus, Vickers hardness, Electrical resistivity

1. 서론

재료의 표면을 개질하기 위한 최근의 기술로는 표면에 이온을 주입하거나 박막 또는 후막을 코팅하는 방법이 있다. 코팅층을 형성하는 방법 중 용사 코팅법 (thermal spray process)은 오랫동안 유용한 후막 코팅법으로 이용되었다. 용사법은 플라즈마 (plasma)나 불꽃 (flame), 아크 (arc) 등을 이용하여 코팅할 입자를 고온에서 녹여 증착하는 방법으로 고온에서 용융된 입자가 증착 후 급속히 냉각되는 과정에서 열응력에 의한 재료의 변형과 산화 현상이 발생하는 단점이 있다. 이러한 용사 코팅법의 단점을 극복하기 위해 개발된 저온 분사법 (cold gas dynamic spray)은 증착될 입자를 용융하지 않은 상태로 초음속의 기체 (supersonic gas jet)를 이용하여 기관에 충돌하는 원리를 이용한 코팅방법이다.

최근에는 이러한 저온분사법을 마이크로 (micro) 스케일의 코팅 (coating) 범위에서 매크로 (macro) 스케일의 적층 (deposition) 범위로 확장하는 연구가 진행되고 있다.

본 연구에서는 순수 알루미늄으로 만든 입자 크기가 평균 77 μ m인 분말 입자를 사용하여 금형의 채널 제작 및 보수를 저온분사법으로 수행하여 이 방법의 새로운 응용분야를 제시하였다.

본 연구에서는 앞의 응용분야에 적용할 때 기초가 될 적층된 층의 물성 특성을 파악하기 위한 실험을 수행하였다. 측정된 물성은 탄성계수, 경도, 전기 저항 등이며, 물성의 변화원인을 FE-SEM (Field Emission Scanning Electron Microscope)과 EDS (Energy Dispersive X-ray Spectrometer) 그리고 밀도 측정을 이용하여 분석하였다.¹

2. 실험 및 결과

2.1 탄성계수 및 경도

탄성계수 및 경도 측정에 사용된 나노 압입 시험기는 한국기계연구원에서 보유하고 있는 Nano Indenter XP의 CSM (Continuous Stiffness Measurement) 모듈로, 압입 깊이에 따른 탄성계수와 경도를 측정할 수 있다.

Fig. 1는 순수 알루미늄과 일반 알루미늄 합금 그리고 Al 6061-T6의 참고문헌 값을 실험에서 얻은 적층된 부분의 결과와 비교한 그래프이다. 적층된 알루미늄 층의 탄성계수는 대표문헌 값들보다 10 ~ 13% 정도 더 작게 측정되었다. 비커스 경도에서는 적층된 알루미늄 층이 순수 알루미늄보다는 크고 Al6061-T6보다는 작게 측정되었다.¹

2.2 전기 저항

전기 저항 측정에 사용된 기기는 INSTEK사의 Milli-Ohm Meter GOM-801G이다. 이 기기의 측정 범위는 20m Ω ~20k Ω 까지이며 10 $\mu\Omega$ 의 고 분해능을 가지고 있다.

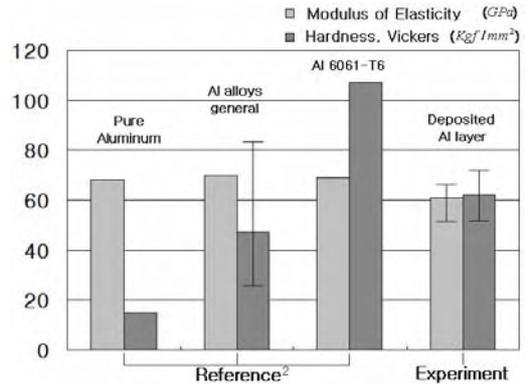


Fig. 1 Measured elastic modulus (E) and Vickers hardness (Hv)

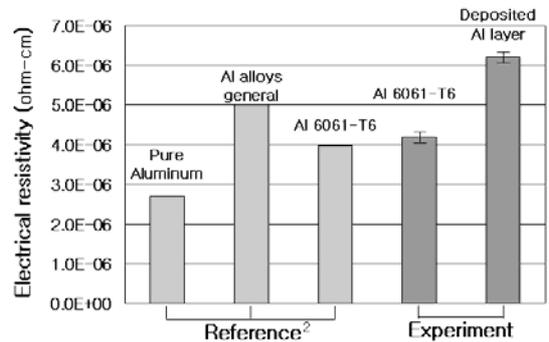


Fig. 2 Measured electrical resistivity

Fig. 2 와 같이 전기 저항 측정 실험에서 Al 6061-T6의 실험값이 참고문헌 값과 약 5%정도 차이를 보이므로 실험의 정확성을 확인할 수 있었고, 적층된 알루미늄 입자의 전기 저항값은 Al 6061-T6의 실험값보다 약 48%, 순수 알루미늄의 참고문헌 값보다 약 130% 더 크게 측정되었다.¹

2.3 표면 분석

본 실험에서 표면분석에 사용한 장비는 나노종합플랫폼센터에서 보유하고 있는 FE-SEM 과 EDS 이다.

식각된 표면을 FE-SEM을 사용하여 Fig. 3과 같은 분석 사진을 촬영하였다. 사진에서 보는 바와 같이 표면에 식각되지 않은 결정들이 층마다 다르게 분포하고 있음을 알 수 있다. 따라서 EDS를 사용하여 식각되지 않은 결정의 원소를 분석하였다. EDS에 의해 얻은 자료 Fig. 4에서 알 수 있듯이 식각되지 않은 결정은 산소를 포함하는 산화알루미늄으로 밝혀졌다.

따라서 FE-SEM과 EDS를 통해 저온분사법으로 알루미늄 분말 입자를 적층할 때, 알루미늄 분말은 대기 중에서 산화되면서 알루미늄(Al)과 산화알루미늄(Al₂O₃)이 섞여있는 복합재료 층을 형성함을 확인하였다.

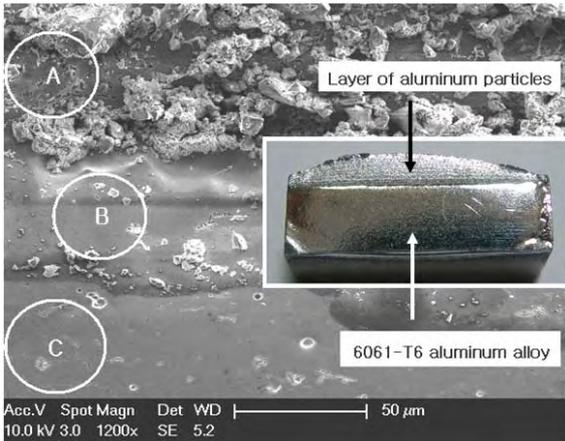


Fig. 3 SEM image of specimen's section :

- A : Layer of aluminum particles
- B : Interface between substrate and particles
- C : Substrate of 6061-T6 aluminum alloy

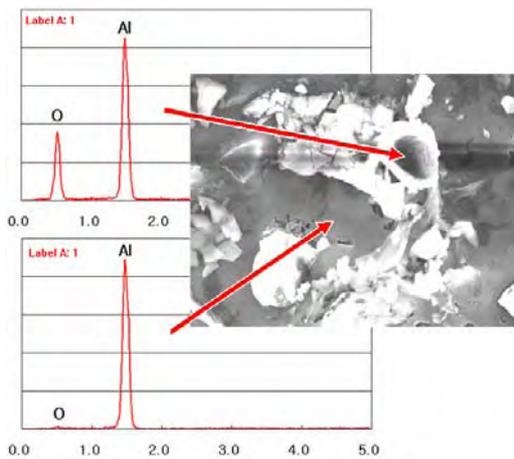


Fig. 4 EDS's result for specimen's section

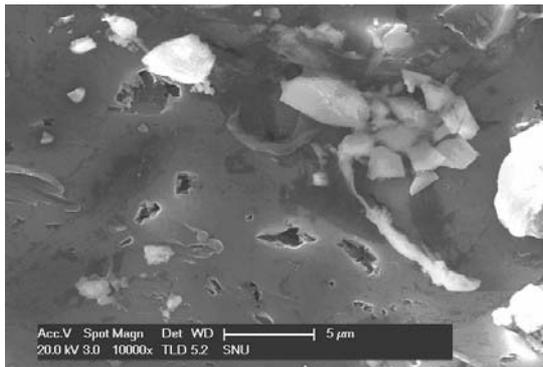


Fig. 5 SEM image of porous surface in specimen

이를 통해, 저온분사법에 의해 적층된 층이 순수 알루미늄의 경도보다 높은 것은 산화알루미늄에 의한 것으로 판단된다.

또한, 표면 분석을 하면서 저온분사법으로 적층된 알루미늄 층은 Fig. 5와 같이 수 마이크로미터 크기의 기공들을 내포하고 있음을 확인하였다.

기존 용사법에서는, 입자가 모재 충돌시 충분한 소성변형이 일어나지 못하여 조대기공 및 입자간 미접합부 등이 발생하여 피막의 치밀도를 저하시키게 되고, 이는 결국 단

면의 경도를 감소시키는 주요 원인이 된다고 밝히고 있다. 이를 바탕으로 저온분사법에서 기공발생에 주요 영향을 미치는 요인은 입자의 분사 속도이며 분사된 입자가 충분한 소성변형을 일으키지 못해 기공이 발생하는 것으로 추정된다.

기존 세라믹 연구에서 기공율 P 가 탄성계수에 미치는 영향을 다음과 같이 나타냈다.

$$E = E_0 \text{EXP}(-k'P) \quad (1)$$

여기서, E_0 는 P 가 0일 때의 탄성계수이며, k' 는 보정 상수이다. 즉, 탄성계수는 기공율이 커짐에 따라 지수적으로 낮아진다. 위의 식 (1)은 기공율이 1일 때 탄성계수가 0이 되어야 하는 조건을 만족시키지는 못하지만 수십%의 기공율 범위에서는 잘 맞는 관계식으로 알려져 있다.¹

2.4 밀도

밀도를 측정된 결과, 기존 알루미늄의 밀도보다 약 4% 더 작게 측정되었다. 이는 저온분사법으로 적층된 알루미늄 층의 탄성계수가 참고문헌 값보다 약 10 ~ 13% 정도 저하된 것의 주요 원인으로 판단된다.¹

3. 결론

본 연구에서는 마이크로 범위의 코팅기술로 개발된 저온분사법을 매크로 범위의 적층기술로 확장하면서 나타나는 재료 물성의 변화를 실험을 통해 확인하였다.

마이크로 압입 실험을 통해 적층된 알루미늄 층의 탄성계수가 순수 알루미늄보다 약 10% 더 작게 측정되었다. 이러한 탄성계수의 저하는 기존 용사법의 연구를 기반으로 생각해보면, 알루미늄 입자가 충분한 소성변형이 되지 않아 약 4%의 기공이 발생하여 나타난 현상이라 판단된다.

비커스 경도 측정에서는 적층된 알루미늄 층이 순수 알루미늄과 Al 6061-T6의 중간 정도의 경도 값을 갖는 것으로 측정되었다. 이러한 경도의 변화 요인은 기공에 의한 경도 감소와 알루미늄 입자의 산화에 의한 경도 증가가 맞물려 복합적으로 나타난 현상으로 판단된다. 따라서 좀 더 높은 경도를 요하는 제품에 적용할 경우 경도를 높이는 별도의 공정이 필요할 것으로 판단된다.

위의 결과로 저온분사법에 의해 적층된 알루미늄 층은 적층 순수 알루미늄 입자와는 다른 물성을 나타내며, 저온분사법을 사용한 두꺼운 코팅을 적용할 경우 이러한 특성을 고려하는 것이 필요하다.¹

후기

이 논문은 서울대학교 2단계 BK21 사업에 의해 지원되었으며, 이에 감사 드립니다. 또한 서울대학교 공학연구소와 Micro Thermal System Research Center, 초음속 저온분사 장비를 지원한 선택트론, 나노인터 측정기를 도와주신 한국기계연구원 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참고문헌

1. 이재철, 안성훈, “초음속 저온분사법에 의해 적층된 알루미늄 층의 재료 물성,” 한국정밀공학회지, 제 23 권, 제 10 호, 2006.
2. www.matweb.com