한국소성가공학회 2006년도 춘계학술대회 논문집 pp. 145~148

초음속 저온분사법에 의한 알루미늄 합금 모재의 변형과 적층된 알루미늄 층의 물성에 대한 연구

이재철[1] · 안성훈#

Study about material properties of Al particles and deformation of Al alloy substrate by cold gas dynamic spray

J. C. Lee and S. H. Ahn

Abstract

Cold gas dynamic spray is a relatively new coating process by which coatings can be produced without significant heating during the process. Cold gas dynamic spray is conducted by powder sprayed by supersonic gas jet, and generally called the kinetic spray or cold-spray. Cold-spray was developed in Russia in the early 1980s to overcome the defect of thermal spray method. Its low process temperature can minimize thermal stress and also reduce the deformation of the substrate. Most researches on cold-spray have focused on micro scale coating, but our research team tried to apply this method to macro scale deposition. The macro scale deposition causes deformation of a thin substrate which is usually convex to the deposited side. In this research, the main cause of the deformation was investigated using 6061-T6 aluminum alloy and properties of deposited aluminum layer such as coefficient of thermal expansion, Elastic modulus, hardness, electric conductivity were measured. From the result of the analysis, it was concluded that compressive residual stress was the main reason of substrate deformation while CTE had little effect.

Key Words : Cold gas dynamic spray (저온분사), Deposition (적층), Deposition property (적층 물성), Coefficient of thermal expansion (열팽창계수), Residual stress (잔류 응력)

1. 서 론

저온분사법 (cold gas dynamic spray)은 용사 코팅법의 단점을 극복하기 위해 러시아에서 처음 개발된 방법으로, 일반적으로 cold-spray 또는 kinetic spray 라고 불린다. 저온분사법 공정에서, 초음속에 의해 가속된 입자는 기판이나 입자들의 녹는점보다 항상 낮은 온도에서 코팅이 되기 때문에 기존의 용사법이 가지고 있는 기판의 산화나 기판의 응력, 저융점 기판에는 코팅할 수 없는 문제점을 해결 할 수 있다[1-3].

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

본 연구에서는 저온분사법을 이용하여 금형의 채널 제작 및 보수를 수행하였다. 이 과정에서 모재의 두께가 얇을 경우 변형이 일어나며, 적층된 분말 층의 물성이 바뀌는 것을 발견하였다.

Fig. 1은 저온분사법을 이용하여 알루미늄 입자를 두께가 3mm인 Al 60601-T6 판재에 적층시킨 시편 사진과 이 시편을 3차원 형상측정기로 측정한 저온 분사 적층 전·후 시편들의 변형량을 나타

1. 서울대학교 기계항공공학부 대학원
교신저자: 서울대학교 기계항공공학부, 정밀기계설계공동연구소, E-mail:ahnsh@snu.ac.kr

낸 그래프이다.

Fig. 2 와 같이 저온분사법으로 얇은 모재에 매크로 단위의 입자를 적층시킬 때 모재의 변형은 입자가 적층되는 방향으로 볼록하게 발생한다.

따라서 본 연구에서는 두께가 얇은 알루미늄 합금에 알루미늄 분말을 초음속 저온분사법으로 적층시킬 때 나타나는 모재의 변형과 적층된 층의 물성 특성을 파악하기 위한 실험을 수행하였고, 측정된 결과를 적용하여 수치적 해석으로 타당성을 확인하였다.

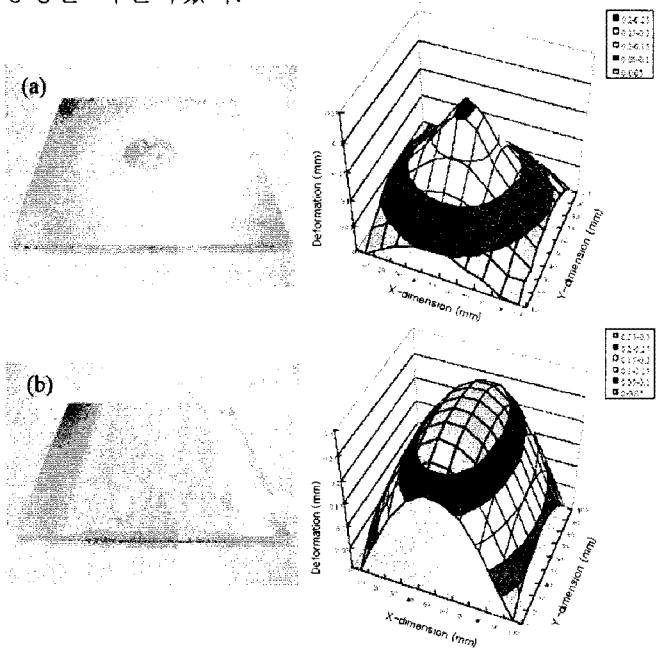

Fig. 1 Cold spray deposition specimen and measured deformation of aluminum plate caused by cold spray deposition: (a) a locally deposited specimen and (b) an areally deposited specimen

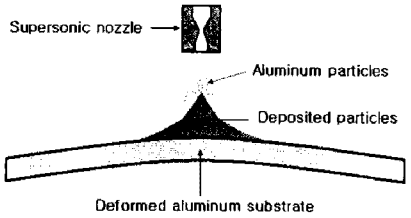

Fig. 2 Deformation of aluminum substrate by cold-spray deposition

2. 실험 및 결과

2.1 알루미늄 합금 모재의 변형

저온 분사 적층 기술은 박막 코팅 기술에서 발전하였기에 적층에 의해 생기는 응력도 코팅 박막에 생기는 응력에서 발전된 것으로 볼 수 있다. 따라서 박막에 생기는 잔류응력에 대한 연구를 기초로 저온분사법의 적층에 의해 생기는 잔류응력을 조사해 본 결과, 열팽창계수 차이로 인하여 발생하는 응력, 박막과 기판 사이의 격자 불일치에 의하여 발생하는 응력, Fig. 3 과 같이 입자 충돌에 의한 모재 표면의 밀도 증가로 발생하는 응력 등이 모재의 변형을 야기시키는 주요 잔류응력으로 추정된다[4].

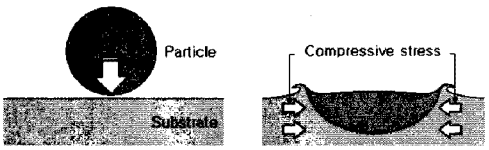

Fig. 3 Splat shape and compressive stress by cold-spray deposition of single particle

본 실험에 사용된 시편들은 격자상수가 같은 알루미늄 재료를 사용하였기 때문에 모재와 적층부 간의 격자 불일치에 의한 응력은 발생하지 않는다. 따라서 모재와 적층부의 열팽창계수 차이와 입자에 의한 모재 표면의 밀도 증가를 주요인으로 추정하여, 이를 밝히기 위해 모재와 적층부의 열팽창계수를 Fig. 4 (a)와 같이 측정하였고, 구멍뚫기방법을 이용하여 모재에 발생한 잔류응력을 Fig. 4 (b)와 같이 측정하였다.

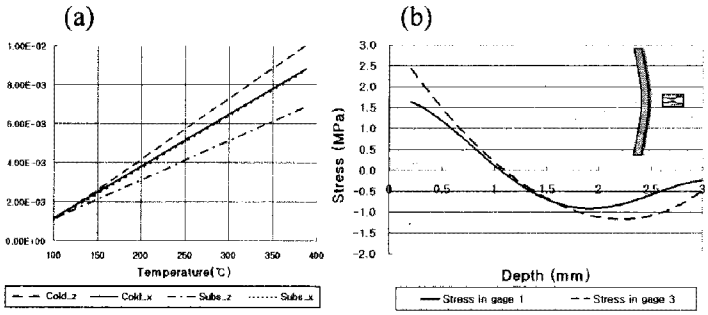

Fig. 4 (a) Result of CTE measurement and (b) Calculated residual stress by Hole drilling method

2.2 재료 물성 측정

2.2.1 탄성계수 및 경도

탄성계수 및 경도 측정에 사용된 나노 압입 시험기는 한국기계연구원에서 보유하고 있는 Nano Indenter XP 의 CSM (Continuous Stiffness Measurement) 모듈로, 압입 깊이에 따른 탄성계수와 경도를 측정할 수 있다[5].

16 회의 실험에서 측정된 경도와 탄성계수는 Fig. 5 와 같고, 구해진 그래프에서 깊이 1000 ~

4000 ㎚의 Berkovich indenter 경도 측정값을 비커스 경도로 환산하여 Fig. 6 과 같이 비교하였다.

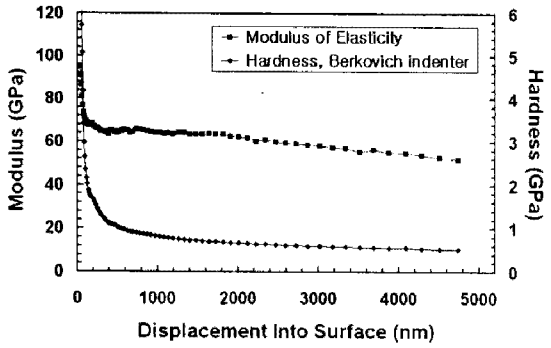

Fig. 5 Indentation load vs. depth curves obtained from the experiments

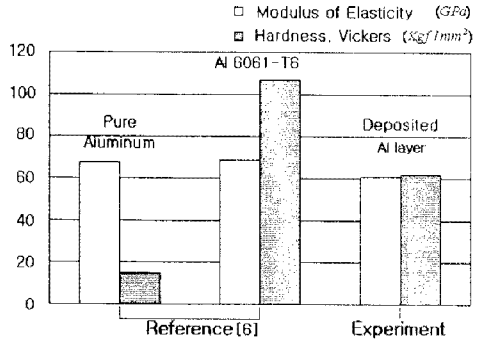

Fig. 6 Measured Modulus of Elasticity (*E*) and Vickers Hardness (*Hv*)

Fig. 6 과 같이 적층된 알루미늄 층의 탄성계수는 순수 알루미늄과 Al 6061-T6 의 문헌 대표값보다 11.7%, 13.2% 더 작게 측정되었다. 비커스 경도에서는 적층된 알루미늄 층이 순수 알루미늄보다 약 313% 더 크게 나타났으나 Al 6061-T6 보다는 약 42% 더 작게 측정되었다.

2.2.2 열팽창계수

열팽창계수 측정 실험에서 시편은 x-y 평면의 이방성 (anisotropy)은 없고 x-y 평면과 z 축 방향의 이방성은 있다고 가정하였다.

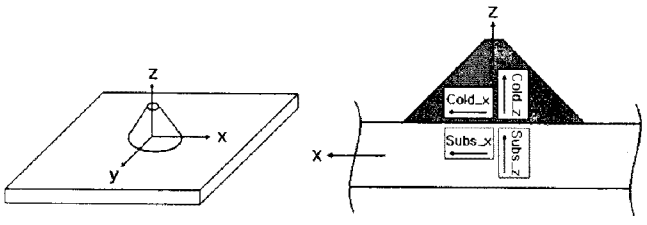

Fig. 7 Specimens for CTE measurement

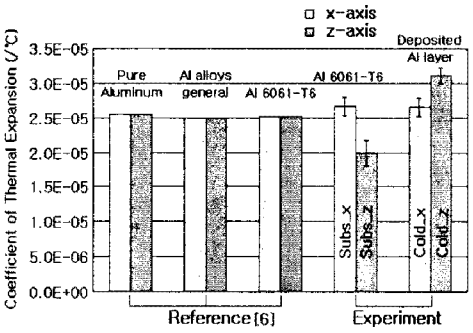

Fig. 8 Measured coefficient of thermal expansion

Fig. 8 에서 Al 6061-T6 의 열팽창계수 측정값은 참고문헌 값보다 *x* 축은 6% 더 크게, *z* 축은 26% 더 작게 나타났다. 적층된 알루미늄 층은 순수 알루미늄 문헌 값보다 *x* 축은 4%, *z* 축은 18% 더 크게 측정되었다.

2.2.3 전기 저항

전기 저항은 측정온도 28℃, 접지거리 1cm 로 하여 실험을 수행하였다.

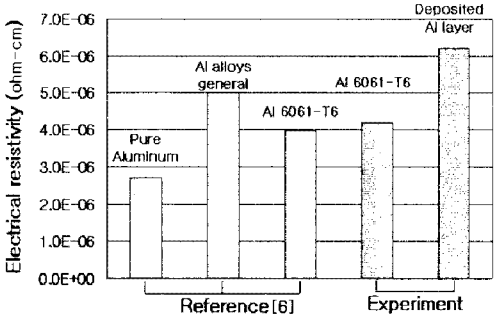

Fig. 9 Specimens and measured electrical resistivity

Fig. 9 와 같이 Al 6061-T6 의 실험값이 참고문헌의 값보다 약 5%정도 크게 측정되었으며, 적층된 알루미늄 분말의 전기 저항값은 Al 6061-T6 의 실험값보다 약 32%, 참고문헌 값보다 약 36% 더 크게 측정되었다.

3. 수치적 해석

실험으로 구한 열팽창계수와 잔류 응력을 적용하여 판재의 변형을 유한요소로 해석하였고, 그 결과는 Fig. 10 과 같다. Fig. 10 의 (a)는 전체 잔류 응력에 대한 변형으로 측정 지점에서 약 454 ㎛의 변형을 보였고, (b)는 열팽창계수에 의한 변형으로

약 24 ㎛의 변형을 보였다. 전체 변형량에서 열팽창계수의 변형량을 제외한 것은 Fig. 10 의 (c)와 같다.

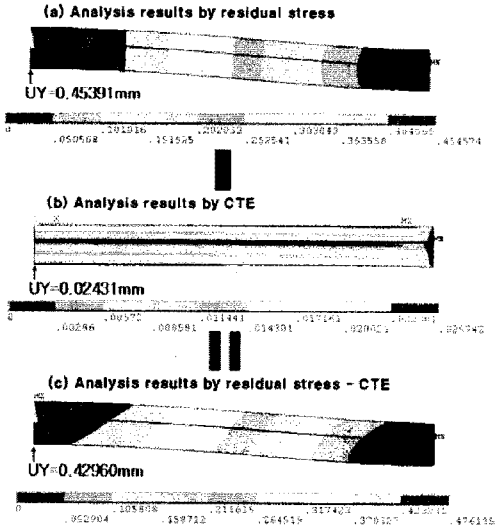

Fig.10 Numerical analysis result on deformation by CTE and residual stress

수치적 계산 결과는 실재 실험 시편에서 측정한 변형량보다 약 130 ㎛정도 큰 수치인데, 이는 운동에너지와 같은 기타 다른 요인들이 고려되지 않았기 때문에 실제의 변형과 차이를 보이는 것으로 생각된다.

4. 결론

본 연구에서는 마이크로 범위의 코팅기술로 개발된 저온분사법을 매크로 범위의 적층기술로 확장하면서 나타나는 재료 특성 및 모재의 변형을 실험을 통해 확인하였다.

초음속 저온 분사 적층시 얇은 모재에 발생하는 변형의 주요 원인은 입자가 운동에너지에 의해 모재의 표면을 파고들어가면서 판재 표면의 팽창 및 밀도 증가를 야기시켜 발생하는 압축잔류응력으로 판단된다

나노 압입 실험을 통해 적층된 알루미늄 층의 탄성계수가 순수 알루미늄보다 약 12% 더 작게 측정되었고, 비커스 경도에서는 적층된 알루미늄 층이 Al 6061-T6 보다는 약 42% 더 작게 측정되었다.

열팽창계수 측정 실험을 통해 적층된 알루미늄 분말의 열에 의한 변형은 두께방향으로 이방성을 가지는 것을 확인하였으며, 적층된 알루미늄 분말의 전기 저항값은 참고값보다 높게 나타나 전도성이 떨어지는 경향을 나타냈다.

위의 결과로 초음속 저온분사법에 의해 적층된 알루미늄 층은 순수 알루미늄과 알루미늄 합금과는 다른 물성을 나타내며, 저온 분사된 재료를 사용하여 표면을 개질하는 경우 이러한 특성을 고려하는 것이 필요하다.

후 기

이 논문은 서울대학교 공학연구소와 ERC (Micro Thermal System Research Center)에 의해 지원되었으며, 초음속 저온분사 장비를 지원한 세렉트론, 나노인덴터 측정을 도와주신 한국기계연구원 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참 고 문 헌

[1] H. J. Kang, S. H. Ahn, J. S. Lee, and J. H. Lee, 2006, Surface Modification of Aluminum by Nitrogen Ion Implantation, International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, Vol. 7, No. 1, pp. 57~61.

[2] T. Steenskiste, J. Smith, R. Teets, J. Moleski, D. Gorkiewicz, R. Tison, D. Marantz, K. Kowalsky, W. Riggs, P. Zajchowski, B. Pilsner, R. McCune, and K. Barnett, 1999, Kinetic Spray Coatings, Surface and Coatings Technology, Vol. 111, pp. 62 ~ 71.

[3] T. Novoselova, P. Fox, R. Morgan, and W. O'Neill, 2006, Experimental Study of Titanium/Aluminum Deposits Produced by Cold Gas Dynamic Spray, Surface and Coatings Technology, Vol. 200, pp. 2775~2783.

[4] H. Y. Lee, 2005, Measurement of Residual Stress of Thin Films, Information center for materials Vol. 10 No. 1, pp. 3~11.

[5] MTS, 2002, Nano Indenter XP User Manual, MTS Systems Corporation.

[6] www.matweb.com