

# 저온 분사 적층과 절삭가공을 이용한 금형보수 사례연구

강혁진\*, 정우균\*, 추원식\*, 안성훈#

## Repair of Mold by Cold Spray Deposition and Mechanical Machining

Hyuk-Jin Kang\*, Woo-Gyun Jung\*, Won-Sik Chu\* and Sung-Hoon Ahn#

### ABSTRACT

Cold gas dynamic spray or cold spray is a novel manufacturing method for coatings. Cold spray is a high rate and direct material deposition process that utilizes the kinetic energy of particles sprayed at high velocity (300-1,200m/s). In this research, a technique to repair the damaged mold by cold spray deposition and mechanical machining was proposed. An aluminum 6061 mold with three-dimensional surface was fabricated, intentionally damaged and material-added by cold spray, and its original geometry was re-obtained successfully by Computer Numerical Control (CNC) machining. To investigate deformation of material caused by cold spray, deposition was conducted on thin aluminum plates (100mm × 100mm × 3mm). The average deformation of the plates was 205~290 $\mu$ m by Coordinate Measurement Machine (CMM). In addition, the cross section of deposited layer was analyzed by scanning electron microscopy (SEM). To compare variation of hardness, Vickers hardness was measured by micro-hardness tester.

**Key Words** : Cold spray (저온 분사), Aluminum particle (알루미늄 입자), Deposition (적층), Mechanical machining (절삭가공), Rapid manufacturing (쾌속제작)

### 기호설명

- $V$  = Velocity of the gas
- $\gamma$  = Ratio of specific heat
- $R$  = Gas constant
- $T$  = Gas temperature
- $M_w$  = Molecular weight of the gas

### 1. 서론

재료의 표면을 개질하기 위한 최근의 기술로는

표면에 이온을 주입하거나 박막 또는 후막을 코팅하는 방법이 있다.<sup>1</sup> 코팅층을 형성하는 방법 중 용사 코팅법 (thermal spray process)은 오랫동안 유용한 후막 코팅법으로 이용되었다.<sup>2</sup> 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.<sup>2,3</sup> 이러한 용사 코팅법의 단점을 극복하기 위해 개발된 저온 분사법 (cold gas dynamic spray)은 증착될 소재 미

접수일: 2005년 8월 1일; 게재승인일: 2006년 6월 16일

\* 서울대학교 대학원

# 교신저자: 서울대학교 기계항공공학부

E-mail ahnsh@snu.ac.kr Tel. (02) 880-7110

입자가 초음속의 기체 기류 (supersonic gas jet)를 타고 기판에 충돌하는 원리를 이용한 코팅방법이다.<sup>4</sup> 저온 분사법은 일반적으로 cold spray 또는 kinetic spray 라고 불리는데, 이는 상온코팅이 가능하여 대상 소재의 물성을 그대로 유지할 수 있고 열응력을 최소화하여 소재의 변형을 막을 수 있다. 또한 기존의 용사 코팅법은 고온 공정이므로 금속 판재에 산화물이 형성되어 금속 코팅 시 부착력이 떨어지는 반면에, 저온 분사법은 산화력이 높은 구리나 알루미늄 등의 금속을 산화하지 않은 상태로 코팅할 수 있어 부착력이 우수하다.<sup>4,6</sup> 300~1,200 m/s로 가속되는 미립자들이 높은 운동에너지로 재료에 충돌하여 증착된 코팅막은 높은 밀도로 적층되고 가공 경화 (work hardening)를 일으켜 벌크 재료보다 더 큰 경도를 가질 수 있다는 장점이 있다.<sup>7-10</sup> 저온 분사법은 빠른 시간 내에 적층이 가능하고 다양한 금속 분말 입자를 금속이나 폴리머, 세라믹 등에 적층할 수 있어 코팅법 뿐만이 아니라 쾌속 조형 (rapid prototyping)에 적용하여 구조물을 제작할 수도 있다. 또한 대상 소재와 같은 입자로 적층을 할 수 있어 금형 또는 부품의 파손된 부위의 보수에도 응용할 수 있다.

본 연구에서는 알루미늄 파우더를 저온 분사법으로 적층하여 파손된 부품을 보수하는 실험을 수행하였다. 또한 적층 시 대상 재료의 변형 정도를 알아보기 위해 얇은 알루미늄 판재에 국부적으로 적층한 후 3 차원 측정기로 변형을 측정하였다. 알루미늄 분말의 적층부와 대상소재 사이의 특성을 분석하기 위해 scanning electron microscopy (SEM)로 단면을 관찰하였다.

## 2. 초음속 저온 분사 적층

초음속을 이용한 저온 분사 적층법은 초음속 제트 기류에 의해 가속된 미세 입자들이 금속이나 세라믹 재료 위에 부딪혀 코팅되는 방법으로 가속된 기체의 온도, 압력, 기체속도, 입자크기 등이 공정 변수로 작용한다.<sup>8</sup> 저온 분사법 공정은 여러 가지 금속 입자에 따른 코팅 효율이 달라지고, 가속된 입자의 속도가 증가할수록 코팅 효율이 증가한다.<sup>10-11</sup> 코팅 효율은 임계속도 (critical velocity)에 의해 결정되는데, 가속된 입자의 속도가 임계속도를 넘지 못하는 영역에서는 기판에 전혀 코팅이 일어나지 않으나 임계속도를 넘어서는 영역에서는 기

판에 코팅이 일어난다.<sup>13-15</sup> 따라서 저온 분사법에서 요구되는 조건으로 입자의 속도는 입자 소재와 크기에 따라 300~1,200m/s 이고 가속되는 입자의 크기는 대체로 1-50 $\mu$ m 정도이다. 또한 제트 기류의 온도가 항상 가속되는 입자의 녹는점 또는 연화되는 점보다 낮아야 한다.<sup>10</sup> 실제로 입자들은 마하 2-4범위의 제트 기류의 도움을 받아 코팅되며, 이 때 가속 기체의 종류로는 공기와 질소, 헬륨, 혼합기체 등을 사용한다. 가속에 필요한 기체의 종류는 다양하나 이들은 공통적으로 입자를 임계속도 이상으로 가속시킬 수 있어야 한다.<sup>11-13</sup> 따라서 기체의 속도를 증가시키기 위해 기체의 온도를 증가시키는 방법을 사용하고 있다. 가스 동역학 모델은 노즐 (nozzle)의 목 부분 (throat)에서의 가스 속도 (V)를 식 (1)과 같이 나타낸다.<sup>8,13</sup>

$$V = \left( \frac{\gamma RT}{M_w} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

Fig. 1은 저온 분사 적층을 위한 시스템의 개요도를 나타낸다. 압축된 기체는 가스 제어 모듈로 유입되어 입자 이송부와 가스 가열부로 나뉘어 들어간다. 입자 이송을 위한 기체는 입자와 혼합되어 예열된 후 노즐부로 이동한다. 입자 가속을 위한 기체는 가스 가열부를 통과하며 가열되고, 가열된 기체가 노즐 (nozzle)의 목부분을 지나며 초음속 기류가 형성된다. 이 때 입자는 초음속 기류를 타고 기판에 부딪히며 적층이 일어난다.

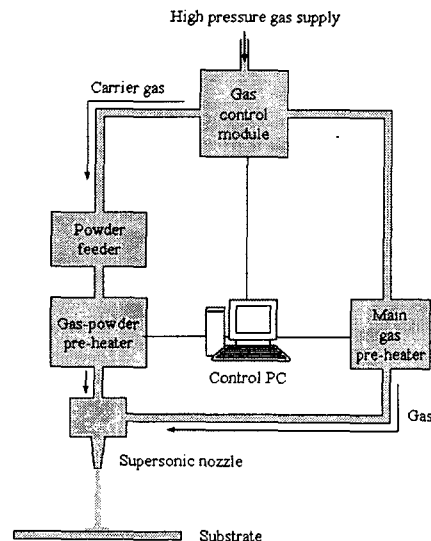


Fig. 1 Schematic diagram of cold spray equipment

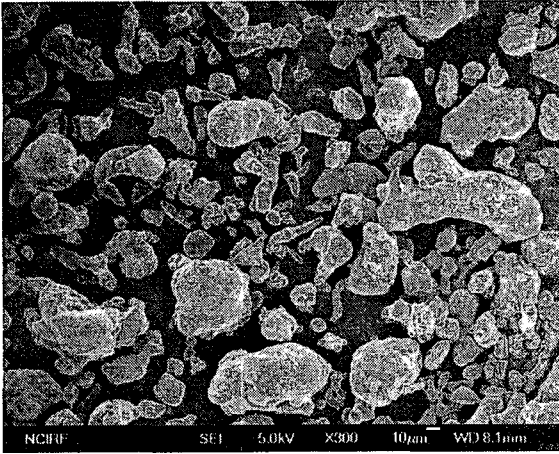


Fig. 2 SEM image of an aluminum powder

입자의 적층 형성기구는 일반적으로 투사되는 분말의 소성변형과 대상재료의 산화막과 같은 얇은 표면 필름을 파괴하는 (splat) 모델로 설명된다<sup>7-10</sup>. 이러한 접합공정은 단접 (forge) 또는 폭발 용접과 유사하다고 할 수 있는데, 이는 일반적으로 고속의 충돌이 분말의 얇은 금속 산화막을 파괴하여 순간적으로 높은 압력과 온도에 의해 원자간 결합을 형성하는 것으로 알려져있다.<sup>13-15</sup> 이 때 압축가스의 온도를 300-600℃까지 가열하면 충돌입자의 부착율과 결합력을 증가시킬 수 있다.

### 3. 저온 분사 적층에 의한 변형실험

본 실험에서는 알루미늄 입자의 가속을 위한 기체로 압축공기를 사용하였다. 일반적으로 공기는 비열 $\gamma$ 가 1.4이고 기체상수 R이 8.314 kJ/kmol-K이며 평균 분자량 Mw는 28.8 kg-m/kg-K이다<sup>11</sup>. 실험에 사용된 알루미늄 분말(AA1-25, (주)창성)을 SEM (JSM-6700F)으로 측정된 사진은 Fig. 2와 같다. 적층에 사용한 알루미늄 입자는 평균크기가 77 $\mu$ m였고 화학적 조성은 99.5%의 알루미늄으로 구성되었다. 알루미늄 파우더의 적층에 사용된 장치는 노즐 목 (nozzle throat)의 직경이 1mm인 Laval타입의 노즐을 사용하였다. 얇은 알루미늄 판재 위에 알루미늄 파우더를 초음속 저온분사 적층할 때 재료의 변형 양상에 대해 확인하기 위해 100mm×100mm의 면적을 갖고 두께가 3mm인 알루미늄 판재 (6061-T6)를 시편으로 사용하였다. 적층 실험은 Fig. 3에 나타난 바와 같이 국부적으로 한 곳에 집중적

으로 적층 (Fig. 3a) 하는 경우와 넓은 면적에 대해 적층 (Fig. 3b) 하는 두 가지 경우에 대해 실험을 실시하였다. 적층 시 온도는 270-330℃의 범위에 있었고 충돌 시 입자의 속도는 약 마하 1.5였다. 알루미늄 파우더를 적층할 시편과 노즐 사이의 이격거리 (standoff distance)는 15mm로 유지하였다. 또한 넓은 면적에 대해 적층할 때는 20mm/sec의 노즐 이송속도 (traverse speed)로 적층하였고 두 시편의 적층 시간은 10분이다.

실험결과 Fig. 3(a)와 같이 국부적 적층을 한 시편은 시편의 중앙부에 집중적으로 쌓여 직경이 약 25mm이고 높이가 약 10mm인 원뿔형상이 형성되었다. 그리고 넓은 면적에 대해 적층한 시편은 Fig. 3(b)와 같이 높이가 약 3-5mm이고 70mm×100mm정도의 면적에 걸쳐 알루미늄 파우더가 적층된 결과를 나타낸다.

알루미늄 파우더 저온 분사 적층 후의 알루미늄 판재의 변형을 비교하기 위해 적층 전·후의 상태를 측정하였다. 변형 측정은 정밀도가 0.01 $\mu$ m인 접촉식 3차원 측정기 (MERLIN 750)를 사용하였다. 이 때 적층 전·후의 변형량의 비교는 시편의 후면, 즉 적층면의 반대면을 적층 전·후에 각각 1cm간격으로 총 100point를 측정하여 그 차이를 3차원 그래프로 표시하였다. Fig. 4(a)와 (b)는 3차원 형상측정기로 적층부의 뒷면을 측정한 저온 분사 적층 전·후의 시편의 변형량을 나타낸다.

Fig. 4(a)의 결과에서 나타난 바와 같이 국부적으로 중앙의 한 곳에 집중적으로 적층하여 높이가 약 25mm인 원뿔 형상이 형성된 경우, 적층 후 변형이 중앙에 집중하여 최대 약 260 $\mu$ m로 일어나는 것으로 확인되었다. 적층이 집중된 중앙부에 비해 시편 가장자리부의 변형은 50 $\mu$ m이내였다. Fig. 4 (b)는 알루미늄 판재에 평균 두께가 5mm이고 너비가 70mm에 이르는 넓은 면적에 대해 적층한 시편의 변형을 나타낸다.

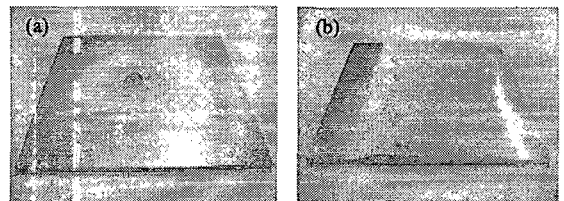


Fig. 3 Cold spray deposition specimen: (a) local deposition and (b) spread deposition

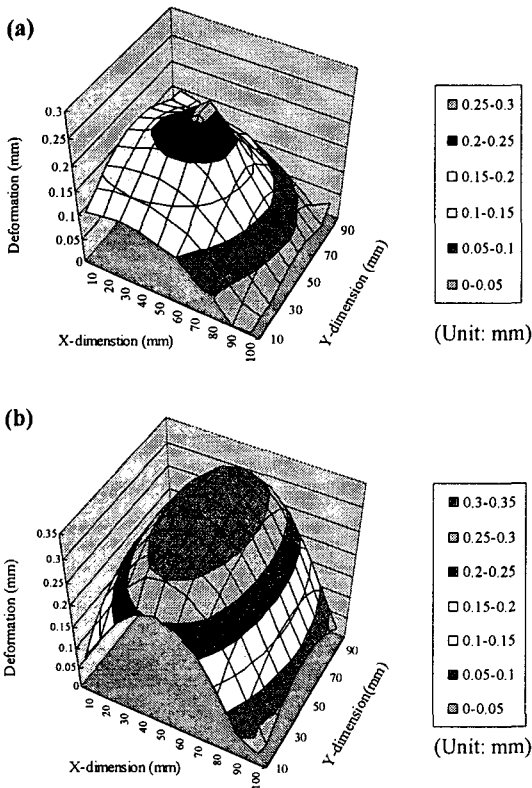


Fig. 4 Measured deformation of aluminum plate caused by cold spray deposition: (a) local deposition and (b) spread deposition

저온 분사 적층 전후의 변형량 측정 실험에서 주목할만한 결과는 알루미늄 판재의 변형이 일어난 방향이다. 적층의 모재로 사용된 두께 3mm의 알루미늄 판재는 Fig. 5에 나타난 바와 같이 알루미늄 파우더가 분사된 방향과 반대 방향으로 휘는 것으로 나타났다. 즉 높은 운동에너지를 갖고 가속된 알루미늄 분말에 의해 충격(bombardment)이나 열변형이 일어나 분사된 방향으로 휘는 변형이 일어날 것으로 예상한 것과는 반대의 결과를 나타냈다. 이는 수많은 알루미늄 입자들이 비교적 높이 연속적으로 쌓이면서, Fig. 6에 나타난 압축잔류응력의 발생원리에 따라 각각의 입자와 기판 사이에서 발생한 압축잔류응력이 얇은 알루미늄 판재를 적층면 쪽으로 휘게 하는 것으로 판단된다.

저온분사 적층부와 알루미늄 기판의 미세구조를 관찰하기 위해 단면을 미세연마입자로 기계적으로 연마한 후 전해연마 하였다. Fig. 7은 초음속

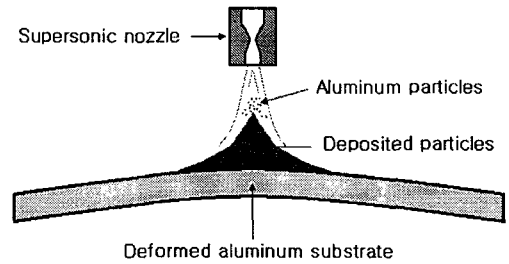


Fig. 5 Schematic diagram of substrate deformation by cold spray deposition

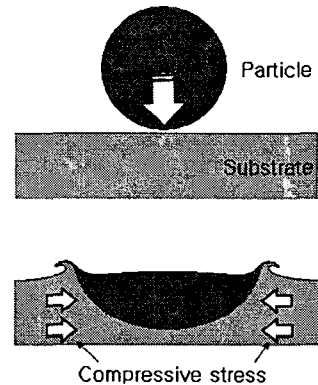


Fig. 6 Formation principle of compressive stress

저온분사 적층에 의해 형성된 알루미늄 층의 단면을 SEM (JSM-6700F)으로 관찰한 결과이다. 사진에 표시된 바와 같이, 경계면을 기준으로 상단부는 알루미늄 파우더가 적층된 부분이고 하단부는 기판으로 사용된 알루미늄 판재 (6061-T6)이다. 알루미늄 분말이 적층된 부분은 각각의 분말이 splat 현상에 의해 변형하여 결합한 구조를 보이고 있다. 분말입자들의 높은 에너지에 의해 결합한 결과, 적층부는 밀도가 높고 치밀한 결합구조를 보이고 있다. 기판과 적층부의 경계면에서는 알루미늄 파우더가 기판 표면에 크레이터(crater)를 형성하며 파묻히고 알루미늄 기판 표면을 손상시킨 것이 관찰되었다.

#### 4. 저온 분사 적층 기술의 적용사례 연구

##### 4.1 금형보수

현재 알루미늄 저온 분사 적층기술은 재료의

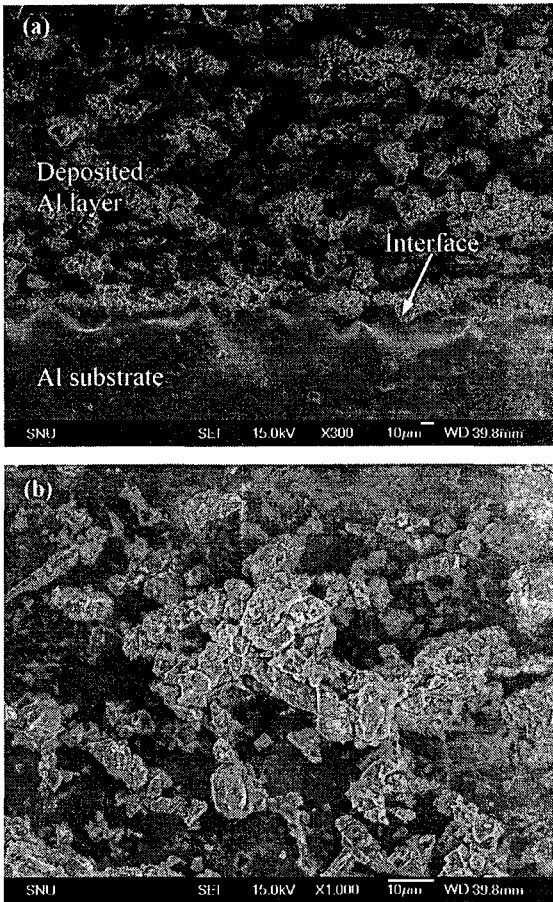


Fig. 7 SEM images of cross section: (a) interface of Al powder deposited layer and an Al substrate and (b) enlarged view of Al powder deposited layer

표면 특성을 개질하기 위한 코팅뿐만 아니라 금속 입자를 가속하여 적층하고 벌크가 형성될 때 높은 밀도로 적층이 이루어지고, 기계적 특성이 유지 또는 강화되는 장점을 이용하여 파손된 부품의 보수 등에 이용 하고자 한다.

현재 산업현장에서는 금형이 손상되거나 마모된 경우 용접 등의 육성 개보수를 수작업을 통해 실시되며, 철계열의 블록의 경우 금형의 예열 (pre-heat treatment)과 열처리 (post-heat treatment) 작업이 매우 어렵고 시간이 많이 소요되는 작업이기 때문이다. 또한 보수 후 예열 및 열처리 작업의 오류로 금형의 품질이 크게 저하되고 쉽게 변형이 되는 단점이 있다.<sup>16</sup>

이러한 금형 보수 또는 수정을 위한 다양한 기술이 소개되고 있는데, 레이저를 이용한 직접 금형 조형법(Laser-aided Direct Metal Deposition)<sup>16</sup> 이나 선택적 레이저 소결법(Selective Laser Sintering: SLS),<sup>17</sup> 선택적 레이저 클래딩(Selective Laser Cladding)<sup>18</sup> 등이다.

따라서 본 연구에서는 Fig. 8에 나타난 바와 같이 저온 분사법에 의해 금속 입자를 적층한 후, 절삭 가공을 통해 최종 형상을 제조하는 개념의 공정을 제안하였다. 이러한 공정개념에 따른 금형 보수 실험을 위해 Fig. 8(a)와 같이 중앙에 원뿔 형상이 있는 40mm×40mm 의 알루미늄 금형 (6061) 을 제작하였다. 그 후 마모 또는 파손된 부위를 모사하기 위해 Fig. 8(b)와 같이 원뿔 형상을 파손 시킨 후, Fig. 8(c)에 나타난 바와 같이 파손된 부위에 알루미늄 파우더를 저온 분사로 적층하였다.

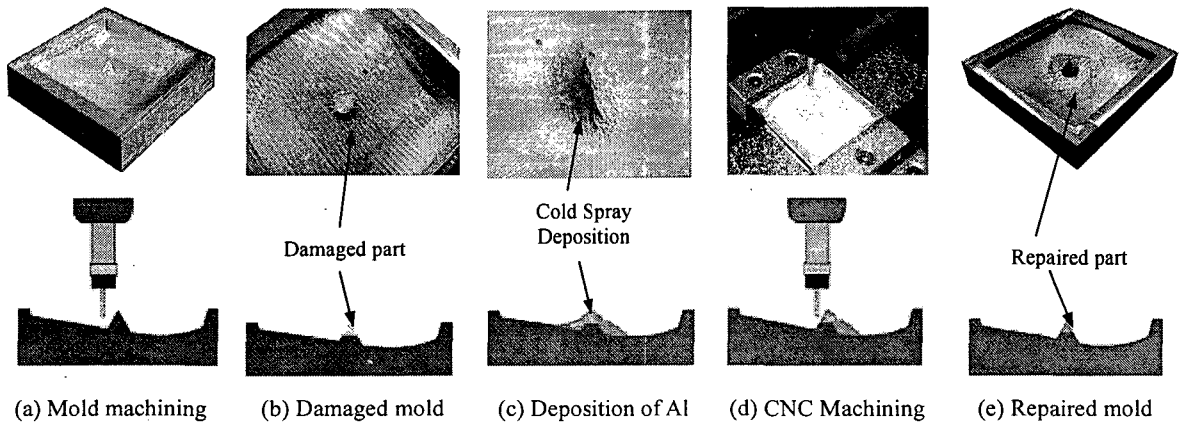


Fig. 8 Process of repairing mold by cold spray deposition and mechanical machining

Fig. 8(d)는 적층된 알루미늄 층을 원래의 원래 형상을 복구하기 위해 CNC가공을 수행하는 과정을 나타낸다. CNC가공을 위한 공구경로는 PowerMILL을 이용하여 생성하였는데, 중앙에 집중된 보수부위를 가공하기 위해 최초의 CAD 모델에서 가공이 필요한 중앙부위만 가공블록으로 설정하여 가공시간을 최소화 하는 가공경로를 생성하였다. Fig. 8(e)는 저온 분사 적층과 기계식 절삭가공을 접목하여 보수한 금형의 최종 형상을 보여준다. 저온 분사 적층법에 의해 생성된 새로운 보수부위의 기계적 물성 변화 측정을 위해 비커스 경도 (HV, vickers hardness) 를 미소경도계 (fischer scope) 로 각각 10 번씩 측정하였다. 알루미늄 파우더 적층부의 HV는 78이었고, 알루미늄 6061-T6의 HV는 86으로 적층부의 경도가 다소 낮게 나타났으나 비슷한 수준을 유지하는 것으로 나타났다.

#### 4.2 냉각채널 제작

저온 분사 적층법은 금형의 열변형을 최소화하고 생산성을 향상시키기 위해 금형 내부에 냉각채널을 형성하는 공정을 가능하게 한다. 냉각채널 (cooling channel)은 사출금형의 성능에 직접적인 영향을 주는데, 저온 분사 적층은 금형의 내부에 여러가지 형태의 냉각수로의 형성을 가능하게 하여 사출금형의 가동률을 증가시키고 금형재질의 사용수명도 증가시킬 수 있어 매우 유용하게 활용될 수 있다.

Fig. 9 에 나타난 공정은 냉각채널을 절삭 가공한 후 알루미늄 분말로 저온 분사 적층하여 냉각채널을 형성하는 과정을 나타낸다. 먼저 Fig. 9(a)와 같이 알루미늄에 절삭 공구를 이용하여 폭이 2mm 이고 깊이가 700 μm인 냉각채널을 가공하였다. Fig. 9(b)는 가공한 냉각채널을 보조 재료로 채우는 과정을 나타낸다. 이 때 사용하는 보조 재료는 모재

보다 녹는점이 낮고 알루미늄 분말 적층 시 충격 에너지를 견뎌낼 수 있는 비스무스 (Bi)와 주석 (Sn)을 7:4 로 혼합한 비스무스틴을 사용하였다. 비스무스틴으로 채워진 채널 위를 Fig. 9(c)와 같이 알루미늄 분말로 초음속 분사 적층하였다.

마지막으로 채널에 채워진 보조 재료를 오븐에서 200℃로 가열하여 제거하므로써 Fig. 9(d)와 같이 알루미늄 모재 내부에 냉각채널을 형성하였다. 최종적으로 형성된 채널의 단면은 Fig. 9(e)에 나타난 바와 같다. 이러한 저온 분사 적층은 단일 금형 내에 여러가지 복합재료로 다양하게 조합할 수 있고 내부에 온도 및 변위센서 등을 추가하는 등 기능성 금형의 제작을 가능하게 한다.

#### 5. 결론

본 연구에서는 초음속 저온 분사법 (cold gas dynamic spray)을 기존의 표면개질 연구에서 확장하여 제품 제조공정에 적용할 수 있는 금형의 보수에 대한 연구를 수행하였고 이를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 3mm두께의 얇은 알루미늄 판재 위에 평균 입자크기 77μm 인 알루미늄 분말을 10분간 적층할 경우 압축잔류응력에 의해 약 250 ~ 300μm의 변형이 발생하였다.
- (2) 알루미늄 금형의 파손부위를 알루미늄 파우더로 초음속 저온 분사로 적층하고 CNC 가공하여 최종적으로 원형과 동일한 형상으로 복구하였다.
- (3) 알루미늄 모재 위에 미세채널을 가공하고 보조 재료로 채운 후 알루미늄 분말을 초음속 분사 적층하고 보조 재료를 제거하여 금형 내부에 냉각채널을 형성하였다.

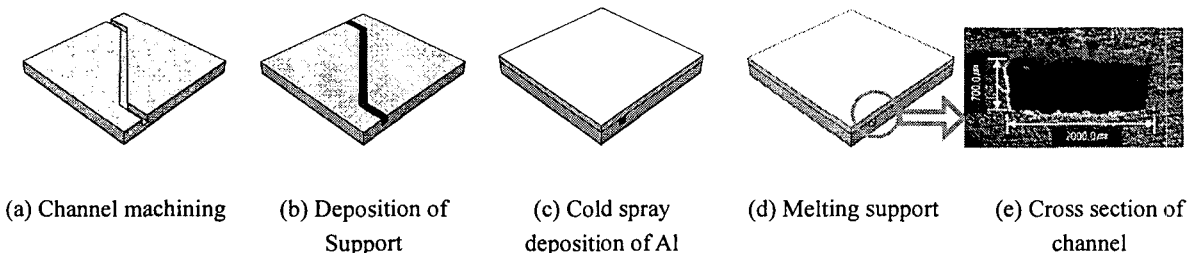


Fig. 9 Process of making a cooling channel of mold by cold spray deposition and mechanical machining

## 후 기

이 논문은 2005 년도 서울대학교 BK 21 사업에 의해 지원되었으며 이에 감사드립니다. 또한 초음속 저온 분사 장비를 지원한 세렉트론 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 참고문헌

- Kang, H. J., Ahn, S. H., Lee, J. S. and Lee, J. H., "Surface Modification of Aluminum by Nitrogen Ion Implantation," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 7, No. 2, pp. 57-61, 2006.
- Lee, H. Y., Yu, Y. H., Lee, Y. C., Hong, Y. P. and Ko, K. H., "Interfacial Studies between Cold-sprayed  $WO_3$ ,  $Y_2O_3$  Films and Si Substrate," *Applied Surface Science*, Vol. 227, pp. 244-249, 2004.
- Clyne, T. and Gill, S., "Residual Stresses in Thermal Spray Coatings and Their Effect on Interfacial Adhesion: A Review of Recent Work," *Thermal Spray Technology*, Vol. 5, pp. 401-406, 1996.
- Lee, H. Y., Jung, S. H., Lee, S. Y., You, Y. H. and Ko, K. H., "Correlation between  $Al_2O_3$  Particles and Interface of Al- $Al_2O_3$  Coatings by Cold Spray," *Applied Surface Science*, 2005(In press).
- Kang, H. K. and Kang, S. B., "Tungsten/Copper Composite Deposits Produced by a Cold Spray," *Scripta Materialia*, Vol. 49, pp. 1169-1174, 2003.
- Novoselova, T., Fox, P., Morgan, R. and O'Neill, W., "Experimental Study of Titanium/Aluminum Deposits Produced by Cold Gas Dynamic Spray," *Surface and Coatings Technology*, 2005(In press).
- Steenskiste, T., "Kinetic spray: A New Coating Process," *Key Engineering Material*, Vol. 197, pp. 59-86, 2001.
- Steenskiste, T., Smith, J. and Teets, R., "Aluminum Coatings via Kinetic Spray with Relatively Large Powder Particles," *Surface and Coatings Technology*, Vol. 154, pp. 237-252, 2002.
- Steenskiste, T., Smith, J., Teets, R., Moleski, J., Gorkiewicz, D., Tison, R., Marantz, D., Kowalsky, K., Riggs, W., Zajchowski, P., Pilsner, B., McCune, R. and Barnett, K., "Kinetic Spray Coatings," *Surface and Coatings Technology*, Vol. 111, pp. 62-71, 1999.
- Zhao, Z., Gillispie, B. and Smith, J., "Coating Deposition by the Kinetic Spray Process," *Surface and Coatings Technology*, 2005. (In press)
- Morgan, R., Fox, P., Pattison, J., Sutcliffe, C. and O'Neill, W., "Analysis of cold gas dynamically sprayed aluminum deposition," *Materials Letters*, Vol. 58, pp. 1317-1320, 2004.
- Kim, H. J., Lee, C. H. and Hwang, S. Y., "Fabrication of WC-Co Coatings by Cold Spray Deposition," *Surface and Coatings Technology*, Vol. 191, pp. 335-340, 2005.
- Kim, H. J., Lee, C. H. and Kweon, Y. G., "Cold Gas Dynamic Spraying Process," *The Korean welding Society*, Vol. 20, No. 4, pp. 53-60, 2002.
- Lee, H. Y., You, Y. H., Lee, Y. C., Hong, Y. P. and Ko, K. H., "Cold Spray of SiC and  $Al_2O_3$  with Soft Metal Incorporation," *Thermal Spray Technology*, Vol. 13, pp. 184-190, 2004.
- Gilmore, D., Karthikeyan, J., Kay, C., Lindermann, J. and Berndt, C., "Particle Velocity and Deposition Efficiency in the Cold Spray Process," *Thermal Spray Technology*, Vol. 8, pp. 576-582, 1999.
- Jee, H. S. and Seo, J. H., "Direct Metal Deposition (DMD);Rapid Tooling;laser cladding;materials," *Society of CAD/CAM Engineers*, Vol. 8, No. 3, pp. 150-156, 2003.
- Ahn, J. H., Park, K., Kim, C. K., Park, B. C. and Choi, S. R., "Development of Rapid Tooling Processes Based on Three-Dimensional CAD/CAM," *Korean Society for Precision Engineering*, Jun-Nam, May, pp. 3-6, 2001.
- Jeng, J. Y. and Lin, M. C., "Mold fabrication and modification using hybrid processes of selective laser cladding and milling," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 110, pp. 98-103, 2001.