

● 연구 논문

Ni-기 자용성합금의 코팅에 관한 기초적 연구(I)

- 용사입자의 편평거동이 코팅층의 기계적 특성에 미치는 영향 -

김 영 식*·김 현 수**·남 기 우***

Fundamental Study on Ni-Base Self-Fluxing Alloy Coating by Thermal Spraying(I)

- Effect of Splat Behavior of Sprayed Particles on Mechanical Properties of Coating Layer -

Y. S. Kim*, H. S. Kim** and K. W. Nam***

Key Words : Ni-Base Self-Fluxing Alloy(Ni-기 자용성합금), Thermal Spraying(용사), Splat Behavior(편평거동), Substrate Temperature(기재온도), Spraying Distance(용사거리), Microhardness Test(미소경도시험), Thermal Shock Test(열충격시험)

Abstract

Ni-base self-fulxing alloy powder particles were flame sprayed onto the SS400 mild steel substrate surface. The effects of both substrate temperature and spraying distance on the splat behavior of sprayed particles were examined.

The results obtained are summarized as follows:

- 1) In the splat behavior of Ni-base self-fulxing alloy particles sprayed onto the SS400 mild steel substrate, splashing was observed under the room temperature condition. On the contrary, it showed circular plate patten in the substrate temperature range over 373K.
- 2) It was cleared that there was close relationship between mechanical properties of coating layer and splat behavior of sprayed particles.
- 3) From the experimental results, optimum spraying conditions showed excellent mechanical properties in the case of Ni-base self fluxing alloy sprayed onto the SS400 mild substrate were 473K of substrate temperature and 250mm of spraying distance.

* 부경대학교 자동차공학과

** 부경대학교 대학원

*** 부경대학교 재료공학과

1. 서 론

용사 프로세스는 용사입자가 고온의 열원에 의해 가열·용융되어 기체에 충돌하고, 이어 충돌한 용융입자가 편평·응고되는 과정으로 이루어진다. 편평·응고는 코팅층 형성의 기본적인 과정이나, 용융입자들이 극히 짧은 시간에 적층되어 코팅층을 형성하므로 각각의 프로세스를 관찰한다는 것은 현재의 계측기술로는 불가능에 가깝다.

이러한 관점에서 용사 프로세스를 모델링해서 수치해석적인 방법에 의해 용사입자의 편평·응고 거동을 분석하려는 시도가 이루어진 바 있으나¹⁾³⁾, 이 수치해석에는 여러 가정을 설정해야 하고 또 실험적으로 얻기 어려운 많은 물성치에 대해 그 추정치를 사용해야 하는 어려움을 안고 있어, 실제 용사 프로세스상의 편평·응고 거동을 설명하기에는 무리가 따른다.

한편 지금까지 이루어진 코팅층의 기계적 특성 개선에 대한 연구는 대부분 시행착오에 의한, 즉 용사변수를 계통적으로 변화시킨 시험편을 작성하고 이에 대한 성능평가시험을 통해 얻어진 결과를 새로운 용사조건에 반영하는, 다분히 경험적이고 또한 거시적 관점에서 접근한 것이었다.

이 연구결과들⁴⁾⁵⁾에 의하면 용사조건의 변화에 따라 코팅층의 적층구조, 즉 기공의 함량이나 입자간의 결합력이 달라지고 또한 용사법의 실용화에 가장 큰 걸림돌이 되고 있는 코팅층의 밀착강도가 변화하는 것으로 알려져 있는데, 이와같이 코팅층 전체로서의 거시적 특성과 코팅층의 기본 구성요소인 용사입자 하나하나의 미시적 특성과의 관련은 아직 충분히 규명되지 못하고 있다. 최근들어 용사입자의 편평거동에 관한 연구⁶⁾⁹⁾가 활발히 이루어지고 있는 것도 바로 이러한 문제의 해결을 위한 노력의 일환인 것이다.

본 연구는 Ni-기 자용성합금의 코팅에 관한 기초적 연구로서, 기재온도와 용사거리의 변화에 따른 용사입자의 편평거동을 분석하고, 이러한 용사입자의 편평거동이 코팅층의 적층구조와 기계적 특성에 미치는 영향을 검토하였다.

2. 실험 재료 및 방법

시험편 작성을 위한 용사장치는 Metco사제의 프레임 용사장치(Metco 5P-II Thermospray System)를, 용사용 분말은 시판의 Ni-기 자용성합금 분말(Metco, 16C)을 사용하였다. 기체는 구조용 연강인 SS400 평판을 사용하였다.

Table 1은 본 실험에서 이용한 Ni-기 자용성합금 분말의 화학조성을 나타낸다.

Table 1 Chemical compositions of Ni-base self-fluxing alloy powder (wt %)

| Ni | Cr | Si | B | Cu | Mo | Fe | C |
|------|----|----|---|----|----|-----|-----|
| Bal. | 16 | 4 | 4 | 3 | 3 | 2.5 | 0.5 |

시험편은 용사입자의 편평거동 분석을 위한 것과 코팅층의 기계적 특성 분석을 위한 것의 2종류를 준비하였다. 용사입자의 편평거동 분석을 위한 시험편은 10×10×5mm로 가공하여 경면처리하고, 코팅층의 기계적 특성 분석을 위한 시험편은 40×50×5mm로 가공하여 #30 Alumina grit에 의해 blasting하였다. 2종류의 시험편 모두 용사전 아세톤에 의한 초음파세척으로 탈지·청정하였다.

용사입자의 편평거동에 미치는 기재온도 및 용사거리의 영향을 조사하기 위해 기재온도를 실온, 373, 473 및 573K의 4 조건으로, 또한 용사거리를 150, 200, 250, 300 및 350mm의 5 조건으로 변화시키면서 용사하여, 모두 20개 조건하에서의 시험편을 작성하였다.

Table 2는 본 실험의 용사조건을 나타낸다.

Table 2 Spraying conditions

| | |
|---------------------------|--------------------------|
| Oxy. gas pressure (MPa) | 0.17 |
| Ace. gas pressure (MPa) | 0.10 |
| Spraying rate (kg/hr) | 9.0 |
| Substrate temperature (K) | 293(R.T.), 373, 473, 573 |
| Spraying distance (mm) | 150, 200, 250, 300, 350 |

Fig. 1은 용사입자 포집의 모식도를 나타낸 것이다. 속도 및 온도가 균일한 입자를 포집하기 위해, 용사건과 기재 사이에 $\phi 3\text{mm}$ 의 구멍을 갖는 스테인리스 고정판 및 $\phi 10\text{mm}$ 의 구멍을 갖는 스테인리스 셔터판을 설치하고, 용사시 셔터판을 자유낙하시켜 셔터판과 고정판의 구멍을 통과하여 $10 \times 10 \times 5\text{mm}$ 의 기재상에 부착된 용사입자를 포집하도록 하였다.

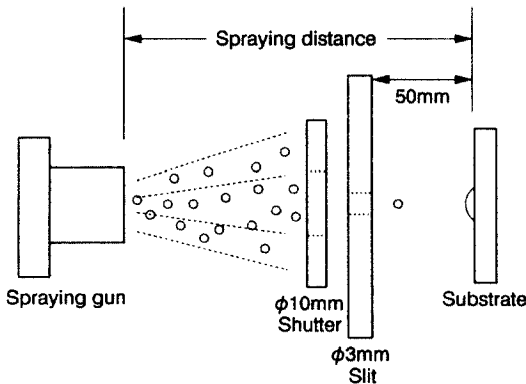


Fig. 1 Schematic drawing of splat collection

포집된 용사입자는 광학현미경을 통해 그 편평거동을 분석하고, 또한 이러한 용사입자의 편평거동이 코팅층의 기계적 특성에 미치는 영향을 검토하기 위해, 전술한 용사조건에 따라 작성된 별도의 시험편으로부터 소정의 크기로 절취하여 조직시험, 경도시험 및 열충격시험을 실시하였다.

경도시험은 500gf의 압자를 이용한 마이크로비커스 경도시험기를 사용하여 코팅층 단면의 미소경도를 측정하였다. 한 시험편당 측정개소는 9개 소로 하였다.

열충격시험은 $10 \times 20\text{mm}$ 로 가공된 시험편을 1073K의 전기저항로 내에서 10분간 유지한 후, 실온의 청수중에 급랭시키는 방법으로 열충격을 가하고, 이러한 열충격에 의해 코팅층의 박리나 깨어짐 등의 손상이 관찰될 때까지 시험을 반복하였다. 코팅층의 1/10정도가 손상되면 전체적인 파손으로 간주하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 용사입자의 편평거동에 미치는 용사조건 영향

Fig. 2는 용사거리 250mm인 경우에 있어서 기재온도의 변화에 따른 용사입자의 편평거동과 코팅층의 적층구조를 함께 나타낸 것이다.

그림에서 알 수 있는 바와 같이 용사입자의 편평거동은 기재온도에 따라 뚜렷한 특징적인 변화를 나타내고 있다. 즉, 실온의 기재상에서 splashing을 나타내었던 용사입자의 편평거동은 기재온도 373K를 기점으로 해서 그 이상의 온도 조건에서는 원판형의 편평거동을 보이고 있는데, 특히 기재온도가 474K에 이르게 되면 거의 진원에 가까운 형태를 보이고 있다.

기재온도의 변화에 따른 용사입자의 이러한 편평거동은 기재상에 포집된 대부분의 용사입자들에게 나타난 공통적인 현상이었는데, 이러한 결과는 용사입자의 편평거동이 기재온도에 크게 영향을 받는다는 사실을 잘 나타내고 있다. 즉, 용사입자가 기재에 충돌하여 편평·응고될 때 splashing을 나타내는가의 여부는 용사입자의 충돌구동력과 표면장력의 균형에 의해 결정되는 것으로, 기재온도가 낮을 경우 충돌구동력이 상대적으로 크기 때문에 splashing을 나타내게 되지만, 특정온도를 기점으로 그 이상의 온도에서는 표면장력이 커져 splashing이 억제되고 원판형의 편평거동을 보이게 되는 것이다.

한편 용사입자의 크기에 따라서는 뚜렷한 특징적인 변화가 관찰되지 않았는데, 이러한 점으로 미루어 볼 때 입경의 조성은 용사입자의 편평거동과는 큰 관계가 없는 것으로 판단된다.

SUS304 기재에 대한 Ni 용사입자의 편평거동을 분석한 福本 등의 연구결과⁶⁾에 의하면, 기재온도가 573K에 이르기까지의 용사입자의 편평거동은 강한 splashing을 나타내고, 그 이상의 온도에 있어서는 원판형의 편평거동을 나타내어 본 연구의 결과와는 그 천이온도에서 200K 정도의 차이를 보이고 있는데, 이는 기재와 분말의 종류,

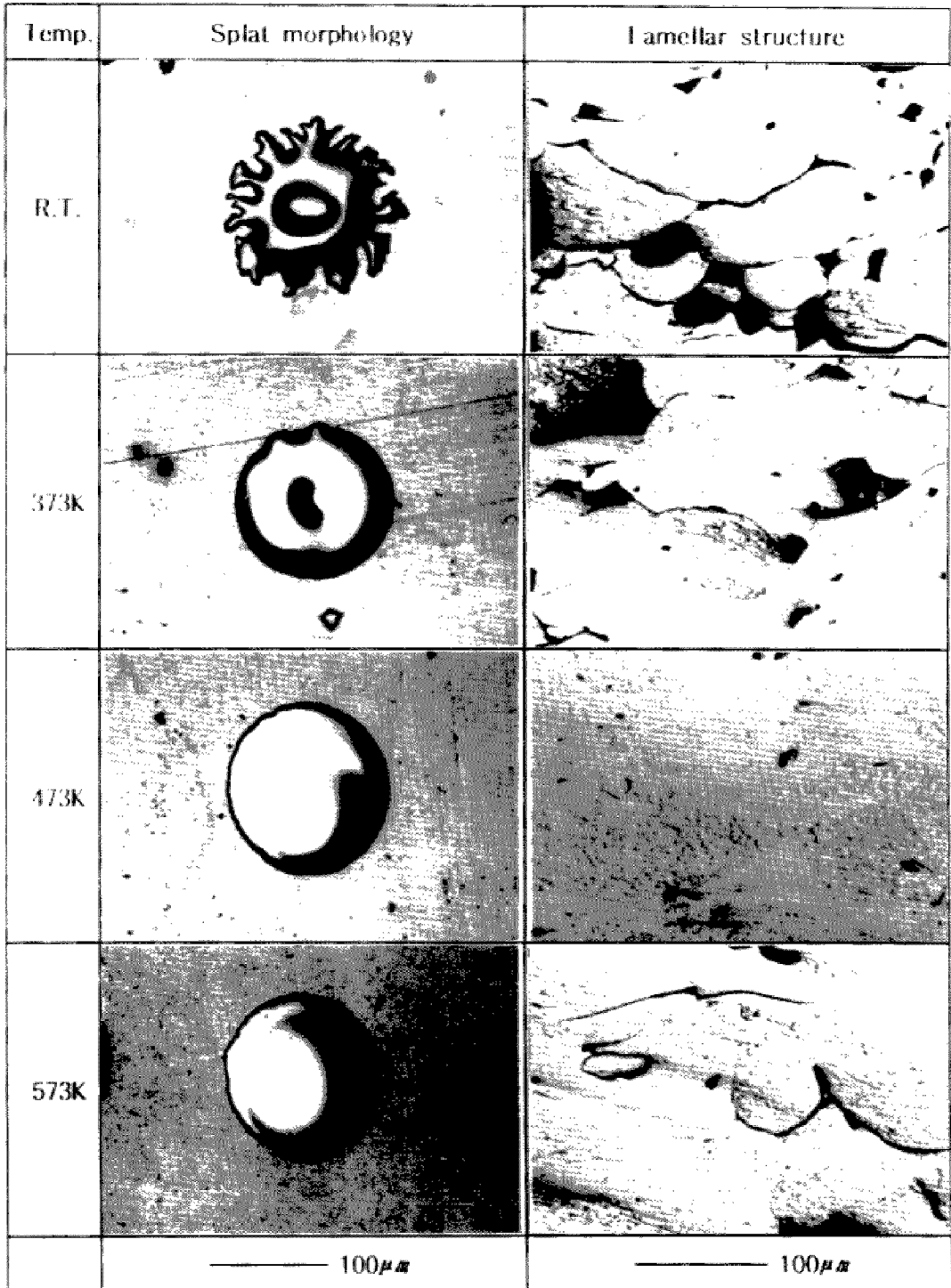


Fig. 2 Splat morphology and lamellar structure with different substrate temperature (spraying distance: 250mm)

용사입자의 온도와 비행속도, 표면장력 등 제반 물성치와 용사조건에 차이에 기인하는 것으로 생각된다. 즉, 福本 등이 실험에서 사용한 제반 용사조건하에서의 용사입자는 본 실험의 경우보다 높은 충돌구동력을 지니게 됨으로써 splashing을 억제하기 위한 기재온도가 본 실험의 경우보다 훨씬 높아지게 되는 것으로 판단된다.

Fig. 2의 우측에 나타낸 그림은 기재온도의 변화에 따른 코팅층의 적층구조를 나타낸 것으로 용사입자 하나하나의 편평상태가 코팅층의 적층구조에도 직접적인 영향을 미친다는 사실을 잘 나타내고 있다. 용사입자가 기재에 충돌하여 편평될

때 splashing을 나타내는 실온의 조건하에서 작성된 용사코팅층의 내부에는 많은 기공이 포함되어 있는데, 이는 Fig. 2의 좌측 그림에서 보여지는 바와 같이 splashing을 나타내는 용사입자는 기재에 충돌하여 편평될 때 퍼짐성이 좋지 못하여 그 형태도 일정하지 않고 또한 두께도 균일하지 않으므로, 이러한 용사입자가 적층될 때에는 그 내부에 다수의 기공이 존재하며 또한 용사입자들 사이의 계면도 뚜렷하게 관찰되는 것이다. 본 실험의 경우 기재온도 473K의 조건하에서 작성된 코팅층이 기공이 거의 없는 가장 치밀한 적층구조를 나타내고 있는데, 이는 용사입자가 이

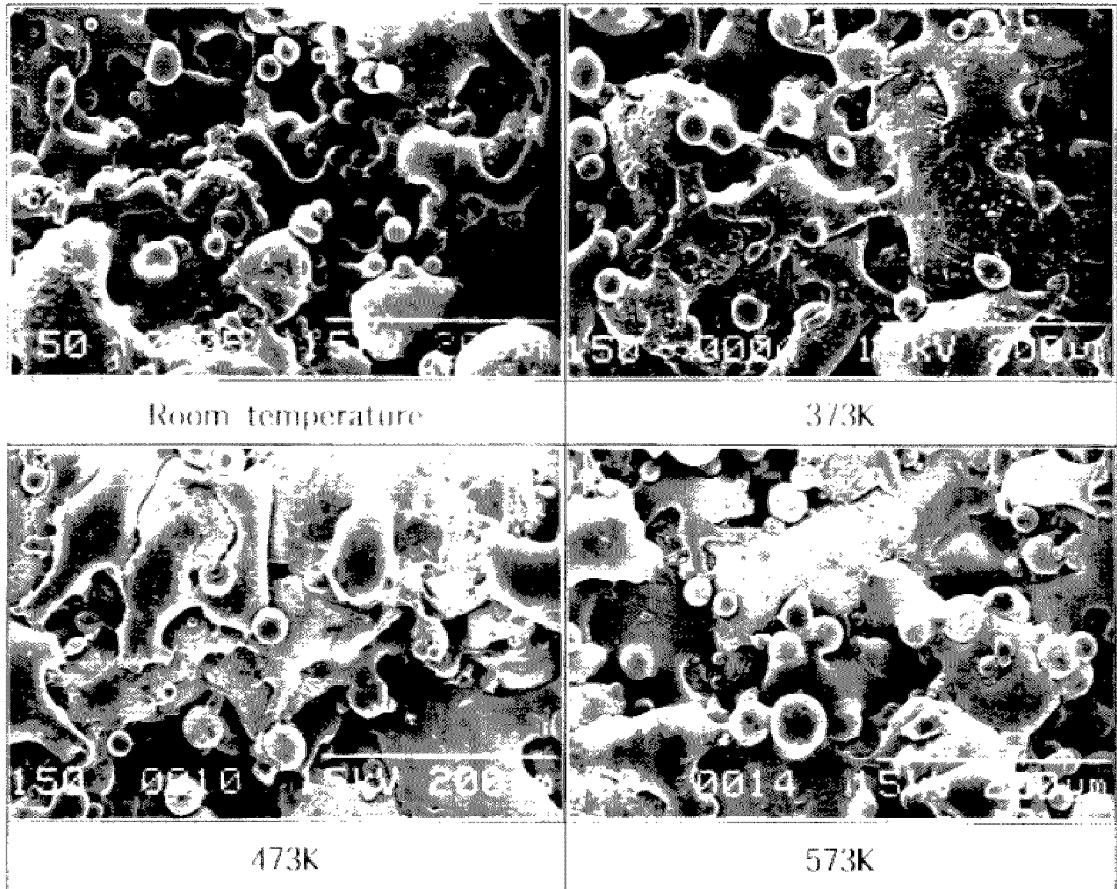


Fig. 3 SEM surface morphology with different substrate temperature(spraying distance: 250mm)

Ni-기 자용성합금의 코팅에 관한 기초적 연구(I)

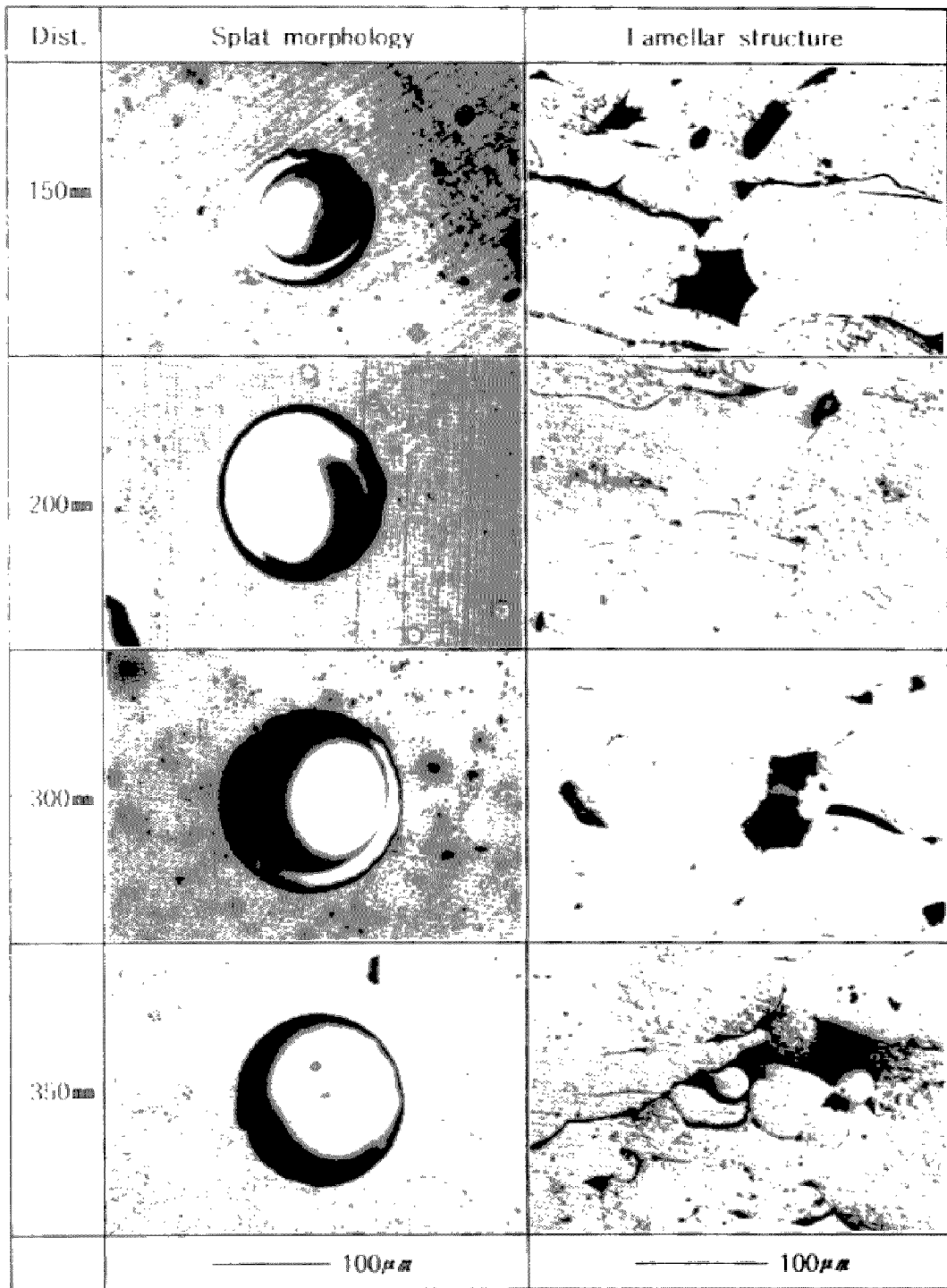


Fig. 4 Splat morphology and lamellar structure with different spraying distance (substrate temperature: 473K)

온도의 기재에 충돌하여 편평될 때 그 퍼짐성이 가장 양호하여 두께가 균일하고, 또한 입자간의 응결성도 강하기 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 3은 기재온도의 변화에 따른 용사입자의 표면적층상태를 나타낸 SEM사진으로 473K이상의 기재상에 작성된 코팅층이 그 이하의 온도의 기재상에 작성된 코팅층에 비해 용사입자의 퍼짐성이나 입자간의 응결성이 양호하다는 것이 잘 나타나 있다.

경면처리된 평활기재상에 용사입자가 충돌하는 것과 적층되어 있는 코팅층에 새로운 용사입자가 충돌하는 것은 상대재료와 표면상태가 다르다. 그럼에도 불구하고 기재상에 충돌할 때 가장 양호한 편평거동을 나타내는 조건하에서 작성된 코팅층이 가장 양호한 적층구조를 갖는다는 것은 결국 기재상에 제일 먼저 충돌하여 용사코팅층의 기저를 형성하게 되는 용사입자의 편평상태가 코팅층 전체의 적층구조에도 영향을 미친다는 사실을 잘 설명하고 있는 것이다.

Fig. 4는 기재온도 473K인 경우에 있어서 용사거리의 변화에 따른 용사입자의 편평거동을 코팅층의 적층구조와 함께 나타낸 것이다. 용사거리 250mm의 경우는 Fig. 2에 나타나 있으므로 본도에서는 생략하였다. 이 결과들을 살펴보면 기재온도 473K인 경우에 있어서는 용사거리 200~250mm일 때 상대적으로 양호한 편평거동과 적층구조를 나타내고 있다.

본 실험에서는 용사입자의 가속을 위한 별도의 가속장치를 사용하지 않았는데 이 경우 용사입자의 비행속도는 용사건으로부터 거리가 멀어질수록 떨어지게 되고, 따라서 기재에 충돌하는 순간의 충돌구동력도 작아지게 된다. 전술한 바와 같이 용사입자가 기재상에 충돌하여 편평될 때의 거동은 용사입자의 충돌구동력과 표면장력의 관계에서 결정되는데, 이 두 개의 인자가 어느 한 쪽이 지나침이 없이 균형을 이룰 때 가장 양호한 편평거동을 나타내는 것으로 생각된다. Fig. 2에서 용사거리를 일정히 유지하고 기재의 온도를 변화시키는 것은 용사입자가 기재에 충돌하여 편평되는 순간의 표면장력을 변화시키는 것으로, 기

재온도 473K인 경우 적층구조가 가장 양호한 것은 바로 이 조건하에서 용사입자의 충돌구동력과 표면장력이 균형을 이루기 때문인 것으로 판단된다. 또한 Fig. 4에서 기재온도를 일정히 유지하고 용사거리를 변화시키는 것은 기재에 대한 용사입자의 충돌구동력을 변화시키는 것으로, 용사거리 200~250mm일 때 다른 조건들에 비해 양호한 적층구조를 나타내고 있는 것도 역시 이 조건하에서 용사입자의 충돌구동력과 표면장력이 균형을 이루기 때문인 것으로 판단된다.

한편 용사입자의 편평거동에 영향을 미치는 인자를 기재측 인자와 입자측 인자로 나누어 생각해 보면 기재측 인자로는 산화막의 존재, 밀도, Young율, 열팽창계수 등을, 입자측 인자로는 입자의 온도, 냉각속도, 표면장력 등을 들 수 있는데, 산화막의 존재를 제외한 대부분의 인자들은 온도에 의존하는 것으로 결국 용사입자의 편평거동은 기재온도가 주요한 지배인자이며, 본 실험의 결과는 이러한 사실을 잘 보여주고 있는 것이다.

3.2 코팅층의 기계적 특성에 미치는 용사조건의 영향

Fig. 5 및 Fig. 6은 각각 기재온도 및 용사거리의 변화에 따른 코팅층의 단면미소경도를 나타낸 것이다. 이 결과에 의하면 용사거리가 250mm일 경우에는 기재온도가 473K일 때, 기재온도가 473K일 경우에는 용사거리가 250mm일 때 가장 높은 경도값을 나타내고 있는데, 이는 전술한 바와 같이 이 조건하에서 용사입자의 편평상태가 가장 양호하고, 따라서 가장 치밀한 코팅층이 형성되었기 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 7은 용사거리를 250mm로 일정하게 유지하고 기재온도를 변화시켰을 경우, Fig. 8은 기재온도를 473K로 일정하게 유지하고 용사거리를 변화시켰을 경우에 있어서 초기 손상이 발견될 때까지의 열충격 반복회수를 나타낸 것이다.

조면화에 의한 영향을 무시한다고 하면, 코팅층의 열충격특성에 영향을 미치는 주지배인자는 기재와 코팅층 사이의 계면에 작용하는 잔류응력이다. 용사입자가 기재에 충돌하여 냉각될 때 기재의 수축은 거의 없는 반면 용사입자는 크게 수축

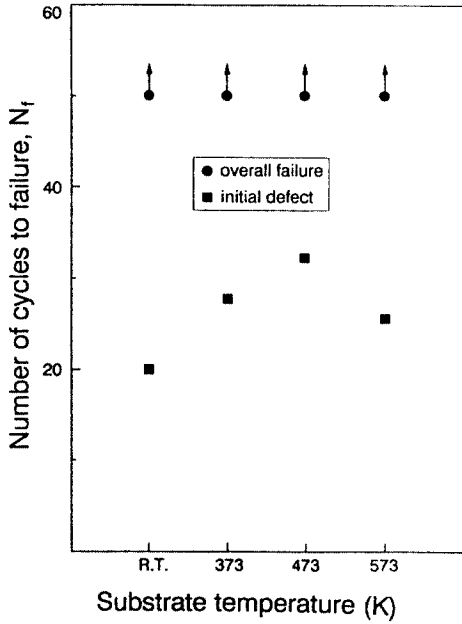


Fig. 5 Microhardness of coating layer with different substrate temperature (spraying distance: 250mm)

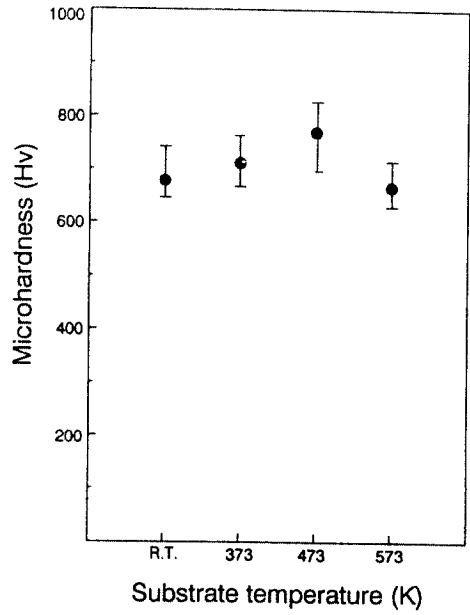


Fig. 7 Thermal shock resistance of coating layer with different substrate temperature (spraying distance: 250mm)

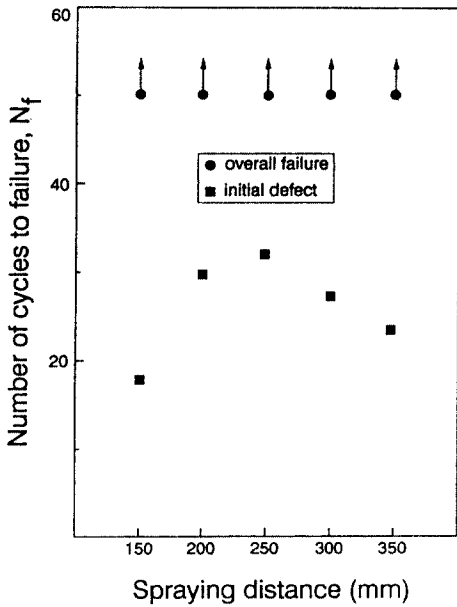


Fig. 6 Microhardness of coating layer with different spraying distance (substrate temperature: 473K)

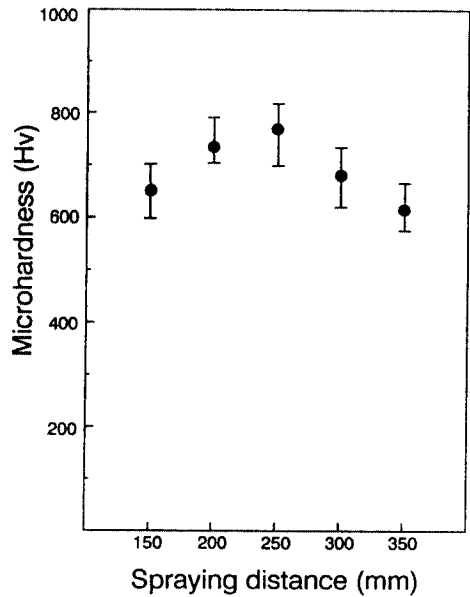


Fig. 8 Thermal shock resistance of coating layer with different spraying distance (substrate temperature: 473K)

되므로 용사후 코팅층에는 압축잔류응력이, 기재층에는 인장잔류응력이 남게 된다. 용사전 기재를 적절한 온도로 예열하여 냉각시 기재와 용사입자의 수축하는 정도가 비슷하게 되면 잔류응력은 최소화되며, 만일 예열온도가 지나치게 크게 되면 용사후의 냉각과정에서 기재층의 수축이 상대적으로 더 크게 되어 코팅층에는 인장잔류응력이, 기재층에는 압축잔류응력이 남게 된다. 코팅층의 잔류응력은 열충격시 박리를 일으키는 직접적인 원인이 된다.

Fig. 7 및 Fig. 8의 결과에서 50회의 열충격에도 코팅층의 박리 또는 코팅층의 1/10이상이 손상되는 전체적인 파손이 발생하지 않았다는 것은 본 실험에서 작성된 시험편들이 양호한 기계적 전처리를 거쳤고, 또한 기재와 코팅층의 계면에서 발생할 정도의 큰 응력수준차가 생기지 않았기 때문인 것으로 해석된다. Fig. 7 및 Fig. 8에 ■으로 나타낸 초기손상들은 모두 기재와 코팅층의 계면에서 발생한 것이 아니라 코팅층의 층간에서 발생한 것으로, 이는 코팅층의 적층구조나 용사입자의 편평거동이 열충격특성에도 직접적인 영향을 미친다는 사실을 보여주고 있는 것이다. 전술한 미소경도시험의 결과와 마찬가지로 기재온도 473K, 용사거리 250mm일 때 가장 양호한 열충격특성을 나타내고 있는 것은 결국 이 조건하에서 용사입자의 편평상태가 가장 양호하고 따라서 코팅층의 적층구조도 가장 치밀하며, 또한 입자간의 응결성이 가장 강하기 때문인 것으로 판단된다.

이상의 결과로부터 코팅층의 적층구조 및 기계적 특성은 용사입자의 편평거동과 직접적인 관계가 있다는 것이 확인되었으며, 따라서 코팅층의 기계적 특성의 개선이나 잔류응력의 제어를 위해서는 기재와 사용분말에 따라 용사입자가 양호한 편평거동을 나타낼 수 있는 최적의 용사조건, 특히 적절한 예열온도의 선택에 세심한 주의를 기울여야 할 것으로 생각된다.

4. 결 론

본 연구는 프레임 용사된 Ni-기 자용성합금 코

팅층의 기계적 특성에 관한 기초적 연구로서, 기재온도와 용사거리의 변화에 따른 용사입자의 편평거동을 분석하고, 이러한 용사입자 편평거동이 코팅층의 적층구조 및 기계적 특성에 미치는 영향을 검토하였다.

주요한 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 용사입자의 편평거동은 기재온도에 의해 크게 영향을 받으며 또한 코팅층의 적층구조 및 기계적 특성은 용사입자의 편평거동과 직접적인 관계가 있다는 사실이 확인되었다.
- 2) SS400 기재에 대한 Ni-기 자용성합금의 용사에 있어서 실온의 기재에 충돌하여 편평된 용사 입자는 splashing 거동을 보였으나, 373K 이상의 기재에 충돌하여 편평된 용사 입자는 원판형의 편평거동을 나타내었다.
- 3) SS400 기재에 대한 Ni-기 자용성합금의 용사에 있어서는 기재온도 473K, 용사거리 250mm인 용사조건하에서 작성된 코팅층이 가장 양호한 적층구조 및 기계적 특성을 나타내었다.

참 고 문 헌

- 1) G. Trapaga and J. Szekeley, "Mathematical Modeling of the Isothermal Impingement of Liquid Droplets in Spraying Processes", Met. Trans., Vol. 12B, pp. 901~914, 1991
- 2) M. Pasandideh-Fard and J. Mostaghimi, "Numerical Simulation of the Spreading and Solidification of a Droplet in Plasma Spray Process", 1994 Thermal Spray Industrial Applications, Ed. by C. C. Berndt and S. Sampath, ASM International, U.S.A., pp. 405~414, 1994
- 3) H. Fukunuma, "A Porosity Formation and Flattening Model of an Molten Particle in Thermal Spray Coatings", J. of Thermal Spray Technology, Vol. 3, No. 1, pp. 33~44, 1994
- 4) 金永植, 金永植, "티타니아 세라믹 용사피막의 기계적 특성에 미치는 용사조건에 관한

- 研究”, 韓國船舶機關學會誌, 15卷 3號, pp. 221~226, 1991
- 5) 森本純司, 山口昭雄, 池原章夫, 大森 明, 荒田吉明, “Ni-Cr合金溶射皮膜の性質に及ぼす溶射條件の影響”, 高溫學會誌, 13卷, 4号, pp. 153~160, 1987
- 6) 福本昌宏, 加藤信一郎, 岡根 功, “Ni溶射粒子扁平形態に及ぼす基材温度の影響”, 金屬學會誌, 58卷, 10号, pp. 1191~1195, 1994
- 7) 福本昌宏, 加藤信一郎, 大渡智善, 黃 亞輝, “種々の金属材料溶射粒子の平滑SUS304鋼基材上での扁平・凝固舉動”, 金屬學會誌, 59卷, 11号, pp. 1178~1184, 1995
- 8) 谷 和美, 原田良夫, 李 長久, “WC-Co系溶射皮膜形成における粒子扁平化とその積層構造” 金屬學會誌, 59卷, 11号, pp. 1130~1135, 1995
- 9) G. Montavon, S. Sampath, C. C. Berndt, H. Herman and C. Coddet, “Effects of the Substrate Nature on the Splat Morphology of Vacuum Plasma Sprayed Deposits”, Proc. 14th Int'l. Thermal Spray Conf., Kobe, Japan, pp. 365~370, 1995