研 究 論 文
大 韓 熔 接 學 會 誌
第 7 卷 第 3 號 1989年 9 月
Journal of the Korean
Welding Society
Vol. 7, No. 3, Sep., 1989

용사법에 의한 용사층의 형성과 기계적 성질에 관한 연구

최기영* · 박동환** · 김명호***

A Study on the Formation and Mechanical Properties of the Spray Deposits by Thermal Spray

K.Y.Choi*, D.H.Park**, M.H.Kim***

Key Words : Thermal Spraying(용사법), Spray Deposits(용사층), Spray Droplet Velocity(용사입자속도), Multipass Spraying(다층용사), Microhardness(미소경도), Erosion Resistance(내 침식성), Raipid Solidification(급속응고)

Abstract

Variation of the spray droplet velocity with spraying distance and the microstructural characteristics of spray deposits fromed by oxy-fuel thermal spraying with Ni-base alloy powder contained chrome boride for hard facing were examined.

Measurements of spray droplet velocity as a function of distance from the nozzle tip were inexcellent agreement with computer simulated predictions.

Optimum condition for thermal spray deposits in this experiment was found to be under 10kg/cm^2 of acceleration gas pressure with 15cm of spraying distance.

Fine microstructure and higher microhardness of the initial part of the deposits due to rapid solidification were found to be able to maintained in a thickness up to 0.4mm, and this initial microstructure and properties could be maintained throughout the thickness of a thick spray deposits by performing the multipass spraying with 0.4mm thickness of each pass.

* 정회원, 현대중공업(주), 종합연구소
** 정회원, 울산대학교 공과대학
*** 울산대학교 공과대학

1. 서 론

용사법(thermal spraying)은 강재들의 표면에 금속이나 그 합금 또는 ceramics 등을 용사하여 피복층을 형성함으로써 필요한 특정의 성질을 부여하는 기술로서[1], 이러한 용사법을 크게 대별하면 oxy-fuel 용사법, 전기 arc 용사법, 그리고 plasma 용사법의 3가지로 구분할 수 있다.

이들 중 oxy-fuel 용사법은 전기 arc나 plasma 용사법에 비하여 최대 가열온도가 낮기 때문에 고융점 재료의 용사는 불가하다. 그러나 저융점 matrix 중에 이들을 첨가하여 분사시킴으로서 요구되는 피복층의 성질을 만족시켜줄 수 있을 뿐 아니라, 그 적용 범위가 광범위하고 장비의 가격이 저렴하며 작동이 용이하기 때문에 현재 가장 널리 보급되어 사용되고 있다.

그리고 이러한 각종 용사법에 이용되는 용사재료는 powder 또는 wire로서 분사도중 분해되지 않는 소재는 무엇이든지 사용이 가능하며, 특히 공업재료나 설비의 hard facing을 위하여 최근 많이 사용되고 있는 재료로는 chrome carbide, tungsten carbide 그리고 chrome boride 등이 함유된 Ni-base 또는 Co-base 합금들이 있다.

본 연구에서는 이들 용사재료중 chrome boride가 함유된 hard facing용 Ni-base 합금 powder를 사용하여 oxy-fuel 용사법에 의하여 coating층을 형성함에 있어, 용사조건에 따른 용사입자의 속도변화, 그리고 용사층의 미세조직 관찰과 미소경도측정, erosion resistance 측정 등에 의하여 최적의 용사조건과 용사층의 미세조직 특성을 규명하고자 시도하였다.

2. 실험방법

본 oxy-fuel spraying에 사용된 장비는 pistol형 분사장치(model : Colmonoy J-3)로서 용사시에 사용된 fuel 가스는 oxygen과 acetylene이 각각 4 kg/cm²와 1.5kg/cm²의 압력비를 갖도록 조절된 혼합가스를 사용하였으며, 분사가스는 습기를 함유하지 않은 고압 산소가스를 사용하였다. 이때 분사가스압은 5kg/cm²와 10kg/cm²의 2가지로 변화시키어 용사하였으며 모재와 분사 nozzle tip 간의 용사거리는 각각 10, 15, 20, 30cm로 변화시키면서 용사를 시행하였다. 용사층을 형성하기 위한 모재 금속은 ABS DH32 grade의 강재이고, 시료의 크기는 두께 8mm에 폭 20mm×길이 30mm의 판재상태로 사용하였다. Hard facing에 사용된 재료는 그입자 크기가 100μm정도인 Ni-base의 fused spray metal powder로서, 용융온도는 약 1100℃ 정도이며, 이 power의 화학조성은 모재금속의 조성과 함께 Table 1에 나타나 있다.

Table 1 Chemical compositions of coating powder and base metal (wt%)

comp. / kind	C	Si	Mn	B	Cr	Ni	Fe	Remark
Coating Powder	0.55	2.4	–	2.0	9.2	Bal	1.1	Size 100μm
Base Metal	0.18	0.35	1.1	–	–	–	Bal	ABS DH32

이 용사층 합금 power에 함유된 Cr이 hard facing의 주인자로 작용한다.

그리고 각각의 용사조건에 따라 분사된 power의 속도 측정은 광학카메라(Nikon제)를 이용하여 분사되는 powder를 1/1000초로 촬영하여 각분사입자들의 비적거리로부터 산출 평균하였다[2]. 분사가스의 속도는 anemometer를 이용하여 분사 gas압과 거리의 변화에 따라 측정하였다. 또한 용사층의 조직관찰은 각 시편들을 cross cutting하여 그 단면을 연마한 후 Ni 합금용 부식액(C_2H_5OH 100cc+HCl 5cc+Fe_2Cl_3 10g)으로 5-10초 동안 부식시킨 후 광학현미경과 주사현미경(SEM)을 이용하여 행하였으며, 미소경도는micro-vickers hardness tester로서 중량 100g 하에서 측정하였다. 용사층의 erosion resistance 평가는 ASTM에 규정된 G76-83 시험법[3]에 따라 수행하였으며, 이때의 test 장치와 조건이 각각 Fig. 1과 Table 2에 나타나 있다.

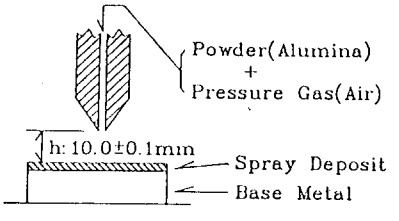

Fig.1 Schematic configuration of erosion resistance test

Table 2 Condition for erosion resistance test

Air Jet Pressure		6.0±0.1kg/cm²
Distance from Nozzle Tip (h)		10.0±0.1mm
Powder Feeding Rate		1.67g/min.
Nozzle Diameter		1.6mm
Powder	Material	Alumina
	Shape	Angular
	Size	100μm

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 용사거리에 따른 용사입자의 속도 변화

용사층(deposits)은 개개의 용사입자들이 모재에 impact되어 고착된 splat layer를 형성함에 의하여 이루어진다. 이들 용사입자들이 모재에 impact 되는 속도에 따라 이들 splat layer의 두께나 splat layer 사이에 존재하는 기공도 등에 영향을 미칠 것으로 예상된다. 따라서, 용사거리에 따른 이들 용사입자의 속도변화에 대하여 검토하였다.

용사입자의 속도는 acceleration gas stream에 의한 friction force와 gravity force, 그리고 powder를 용사재료로 사용할 경우에는 powder가 nozzle tip으로부터 분사될 때의 초기속도등에 의하여 지배를 받을 것으로 예상된다.

이에 대하여 Kim과 Jones[2]는 gas atomization의 경우에 있어서, 입자의 속도변화에 결정적 영향을 미치는 acceleration gas의 속도변화가 용사거리의 증가에 따라 직선적으로 일정하게 감소한다는 가정하에 Ranger와 Nicholls[4]의 식에 gravity force의 영향을 첨가하여 용사 입자의 속도변화를 예측한바 있다. 이들이 시도한 gas atomization의 경우, acceleration gas의 속도가 용사거리에 따라 직선적으로 일정하게 감소한다는 가정하에서도 용사입자의 속도변화 예측치는 실측치와 잘 일치하였다. 이는 이들이 사용한 gas atomization의 경우 acceleration gas의 최대속도가 낮으므로 짧은 용사거리내에서는 accleration gas 속도의 상대적 변화량도 적기때문에 거의 직선적으로 감소한다고 가정하여도 큰무리는 없을 것으로 여겨진다. 그러나 본 실험의 경우와 같이 acceleration gas 속도가 30m/sec.를 초과하는 고속의 경우에는 acceleration gas의 속도는 용사거리에 따라 급격히 감소됨이 Fig. 2와 같이 실측되었다.

따라서 본 연구에 있어서 용사입자의 속도는 용사입자들을 가속시키는 gas의 속도가 거리에 따라 급격하게 감소됨을 고려하여 Boothroyd[5], Kaddah[6], Fiszdon[7]에 의하여 제안된 축방향으로의 속도에 대한 운동 방정식으로 해석하였다. 이

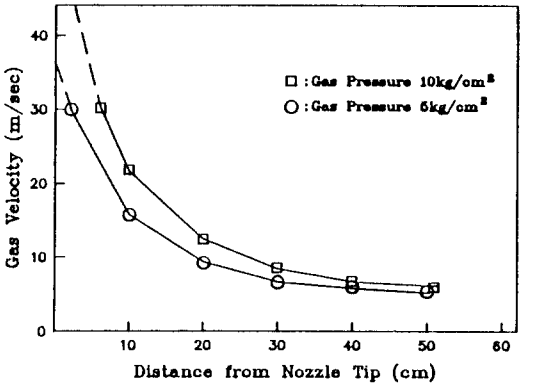

Fig.2 Variation of acceleration gas velocity with distance from nozzle tip

때의 용사입자는 용사중에 비록 용융상태에 있다 하더라도 이 입자들은 표면장력을 가지므로 구형이라 가정하였고, 입자들 상호간의 영향은 무시하였다. 이축방향으로의 운동 방정식(식1)에서 입자의 운동해석을 용이하게 하기 위하여 공간상의 고정 좌표계에 대한 식(식2)으로 변환하여 4th order Runge Kuttta Method를 이용한 수치해석으로서 computer를 이용하여 해석하였다.

$$\frac{\pi \cdot D_p^3}{6} \cdot \rho_p \cdot \frac{dU_p}{d_t} = \frac{1}{2} \cdot C_D \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot D_p^2 \cdot \rho_g \cdot | V - U_p | \cdot (V - U_p) \quad (1)$$

$$U_p \cdot \frac{dU_p}{dL} = \frac{3}{4} \cdot \frac{\rho_g}{\rho_p D_p} \cdot C_D \cdot | V - U_p | \cdot (V - U_p) \quad (2)$$

U_p : Particle Velocity
L : Distance
ρ_a : Air Density
ρ_p : Particle Density
D_p : Particle Diameter
C_D : Drag Coefficient

V : Initial Air Velocity
여기서 항력계수(Drag Coefficient)는
$Re<2$: $24/Re$
$2<Re<500$: $18.5/Re^{0.6}$
$Re>500$: 0.44이고
$Re=|V-U_p|\cdot D_p\ \rho_a/\mu_g$ 이다[6].

본 실험결과에 의하면 분사 powder의 초기속도는 2m/sec.로 측정되었으며, 그리고 용사거리에 따른 용사입자의 속도변화에 대한 실측속도가 위의 수치해석에 의하여 구하여진 예측속도와 함께 Fig. 3에 각각 나타나 있다. 이에 의하면 이들 용사입자의 실측속도와 수치해석에 의한 예측속도는 서로 잘 일치함을 알 수 있다. 특히 용사입자의 속도는 gas pressure가 5kg/cm²일 때 nozzle tip으로 부터 10cm 부근에서 약 9m/sec., gas pressure가 10kg/cm²의 경우에는 20cm 부근에서 약 16m/sec.의 최대속도를 가짐을 알 수 있다.

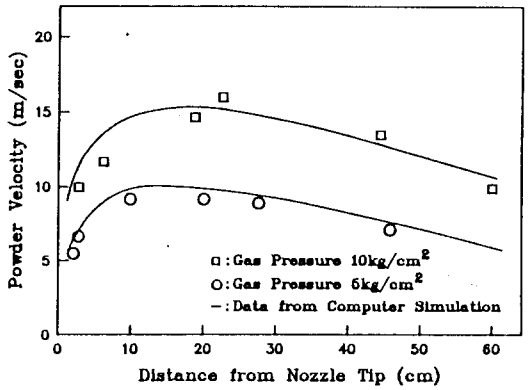

Fig.3 Variation of powder velocity with distance from nozzle tip

이로 미루어볼 때 고속의 acceleration gas를 사용한 조건하에서와 용사입자의 속도변화를 예측하기 위하여는 본 연구에 사용된 새로운 식을 적용하여야 될 것으로 여겨진다.

3.2. 용사층의 미세조직 관찰

Fig. 4는 적정용사조건을 선정하기 위하여 수행된 각각의 용사조건에 따른 용사층의 단면조직을 나타낸 것으로 이들 조직은 substrate직상의 용사층을 관찰한 것이다.

이들 용사층의 조직에서 용사조건에 따라 주조조직, 층상조직, 구형조직으로 분류 할 수 있으

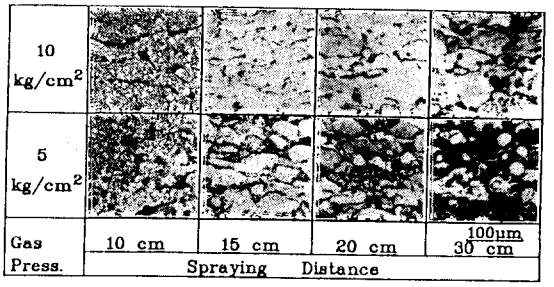

Fig.4 Change in microstructure of spray deposits with spraying distance and acceleration gas pressure

며, porosity의 함유정도도 현저하게 차이가 있음을 알 수 있다.

주조조직은 용사거리가 짧은 10cm에서 보여진다. 이것은 적층된 용사층이 용사도중에 화염에 의하여 가열되어 재용융한 후 응고하여 생성된 조직으로 생각되어진다.

용사압력이 낮은 5kg/cm²에서 용사거리를 20 및 30cm한 경우에서는 구형조직을 볼 수 있다. 이것은 용사거리가 멀어서 용사도중에 용융입자가 응고 혹은 반응고 상태로 substrate위에 적층된 것으로 생각되어진다.

층상조직은 전형적인 급냉응고조직으로 이상적인 용사층의 조직으로 생각되어진다.

용사거리가 멀어짐에 따라서 그리고 용사압력이 10kg/cm²보다 낮은 5kg/cm²에서 porosity의 함유가 많음을 알 수 있다. 그 이유는 용사거리가 멀어질수록 또는 용사입자의 속도가 느릴수록 용사입자가 substrate에 적층되기까지의 시간적 여유가 길기 때문에 flame 열원에 의하여 용융된 용사입자가 부분적으로 응고한 후 substrate에 적층되어 구상과 구상 사이에 틈이 발생하고, 다음 용사시에 이틈이 잔존하기 때문으로 여겨진다.

부분적으로 구형의 미소 porosity가 존재하는 경향도 있다. 이것은 용융입자가 substrate에서 급냉응고로 수축하여 공간이 생기고 다음 용사시에 채워지지 못하여 생성되거나, 응고금속이 산화하여 산화피막이 형성된 후 용융금속과 반응하지 않아 잔존하여 생성되거나, 용융시 가스 흡입에 의하여 생성되는 것으로 사료된다.

Fig. 5는 동일시편에 용사층의 상부와 하부조직 그리고 분말을 용융한 후 노냉한 서냉조직을 비교한 것이다. 용사층의 상부조직(Fig.5 A)이 하부

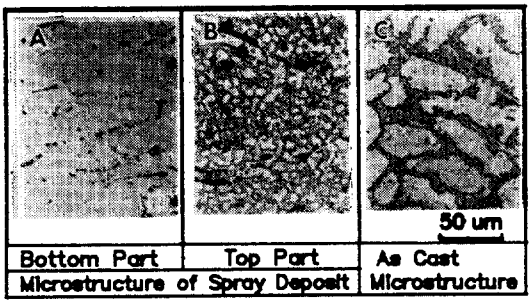

Fig.5 Microstructures of spray deposit and as cast specimen

조직(Fig. 5 B)보다 조대함이 관찰되고 있는데, 이는 용사시 계속되는 flame의 열원과 아울러 deposit된 용사입자들의 응고시 발생되는 용융잠열이 효율적으로 모재방향으로 방출되지 못하고 누적됨으로 인하여 상부부위로 갈수록 응고속도가 모재방향으로 점점 지연되기 때문으로 여겨진다[8]. 그러나 이들용사층 상부 조직은 요융후 노내에서 서냉시킨 시편의 미세조직(Fig. 5C)보다는 훨씬 미세함을 알 수 있다.

이상의 porosity의 양과 조직 형상을 비교하여 볼 때, gas압 10kg/cm²의 경우 용사거리에 따른 용사층 조직의 특성을 상호 비교하여보면 다음의 3단계로 구분할 수 있다.

용사거리	microstructure	porosity
~10cm까지	조대한 조직형성	porosity 소량
~15cm~	미세한 조직형성	porosity 소량
20~30cm	미세한 조직형성	porosity 소량

이로 미루어볼 때 gas 압 10kg/cm², 용사거리 15cm의 용사조건에서 형성된 용사층이 미세화된 조직과 함께 porosity의 양도 적게 형성되어 가장 좋은 용사층을 형성함을 알 수 있다.

3.3. 미소경도의 변화

용사층의 단면조직 관찰에 의하면 동일 용사시편의 경우에도 용사층의 두께가 두꺼워짐에 따라, 즉 substrate로 부터의 거리가 멀어짐에 따라 형성된 용사층의 상부 조직은 점점 조대화되감을 알 수 있었으며, 이러한 미세조직의 변화에 따른 경도변화가 Fig. 6에 나타나 있다. 이에 의하면 substrate로 부터의 거리가 증가함에 따라 그 미소경도값은 Hv430에서 Hv350정도로 감소하고 있으며, 특히 초기에 형성된 용사층의 두께가 0.4 mm이상 두꺼워지면 이들 경도값은 급속히 감소

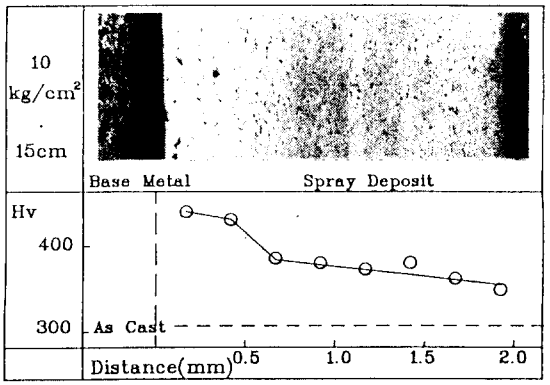

Fig.6 Variation of microhardness with distance from the base metal

함을 알수 있다. 이러한 경도값의 감소는 용사 분말을 노내에서 용융 응고(as cast)시킨 조직의 경도값인 약Hv300정도까지 강하할 것으로 예측된다.

이와같이 초기에 형성된 용사층이 높은 경도값을 갖는 이유는 용사입자가 냉각 매체로 작용하는 cold substrate에 적층되면서 초기에는 열을 급속히 빼앗겨 급속응고가 진행되어 조직은 미세화되고, 첨가된 합금원소의 segregation이 방지되기 때문으로 여겨진다. 그러나 용사층 두께가 점점 두꺼워짐에 따라 상부의 응고조직은 점점 조대화되며 또한 경질합금원소(Cr)의 segregation이 일어남으로 인하여 이들 조직은 낮은 경도값을 갖는다. 이러한 현상은 이들 용사층의 경화요인 합금원소인 Cr의 분포상황을 EDS에 의하여 분석한 결과인 Fig. 7에 잘 나타나 있다. 이에 의하면 하

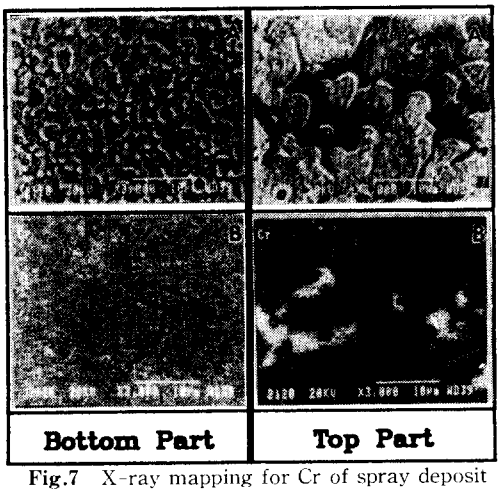

Fig.7 X-ray mapping for Cr of spray deposit

부의 조직은 상부에 비하여 상당히 미세하게 형성되었을 뿐만 아니라 EDS에 의하여 Cr의 분포상황을 mapping한 결과에서도 용사층의 하부에서는 Cr이 고르게 잘 분산되어 분포되어 있으나 상부의 조직에서는 Cr이 조대하게 segregation되어 있음을 알 수 있다. 즉 급냉에 의하여 급속응고된 하부는 조직이 미세화됨은 물론 Cr이 미세하고 고르게 분포되어 그 미소경도가 향상되었다고 볼 수 있다.

3.4. 다층 용사(multipass spraying)

용사층의 두께가 두꺼워짐에 따라 일어나는 용사층 상층부의 온도상승을 방지하여 줄수 있다면 초기에 형성되는 미세한 급속응고 조직을 두꺼운 전 용사층에 걸쳐 형성할 수 있을 것이다. 이를 위한 하나의 방안으로 용사층이 어느정도의 두께만큼 형성된후 용사를 일시중단하여 이들 용사층이 충분히 냉각되어 새로운 cold substrate로 작용할 수 있게된 후 다시 그위에 용사를 반복실시한다면 용사층의 상층부에 일어나는 과도한 온도상승은 방지가 될 수 있을 것이다. 이러한 다층용사(multipass spraying)방법의 효과를 검토하기 위하여 용사층의 형성이 가장 치밀하다고 판단된 용사가스압 10kg/cm², 용사거리 15cm의 조건하에서 용사를 3회 반복 실시하여 용사층의 단면 조직과 경도 변화에 대하여 조사하여 보았다. 그 결과가 Fig. 8으로써 1회 용사후 충분한 시간동안 냉각시킨 후 재용사를 시행할 경우 용사층의 조직 미세화와 이에따른 미소경도값의 증가가 다시 일어남을 알수 있다. 그러나 이 경우에도 재용사층의 두께가 어느정도 이상되면 다시금 미세조직의 조대화 및 이에 따른 경도값의 급격한 하락이 발생됨을 알수 있다. 이는 이미 앞에서 언급한 바와 같이 재용사 초기에 형성된 응고조직은 급속응고에 의하여 미세화되나 어느정도이상의 두께가 되면 역시 용사층의 온도상승이 일어나 냉각이 지연되기 때문으로 예상되며, 본 실험의 경우 이러한 급속응고 효과가 유지되는 용사층의 두께는 대략 0.4mm정도 이하로 여겨진다.

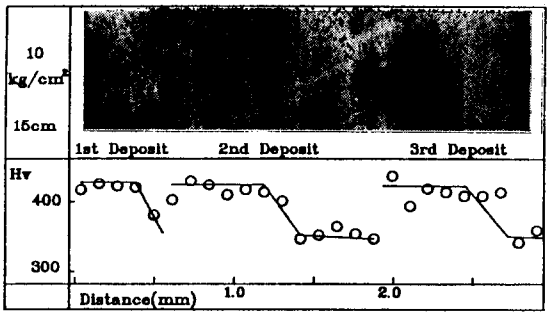

Fig.8 Comparison of microhardness variation through spray deposits produced by multipass spraying

이상의 결과를 바탕으로하여 균일한 미세조직과 미소경도값을 갖는 용사층을 형성하기 위하여, 1회 용사시 형성되는 용사층의 두께를 0.4mm정도로 하여 4회 다층용사(multipass spraying)를 실시하였다. 이와 같이 다층 용사한 용사층의 경도 변화를 Fig. 9에 나타낸다. 이로부터, 전 용사층에 걸쳐 미소경도값은 비교적 균일하게 나타나 있음을 알 수 있다. 이로 미루어볼 때 전 용사층에 걸쳐 미세조직과 미소경도값이 비교적 균일하도록 하려면 1회 용사시 형성되는 용사층의 두께가 0.4mm이하가 되도록 하여 다층용사(multipass spraying)를 행하면 가능하다는 결론을 얻을 수 있었다.

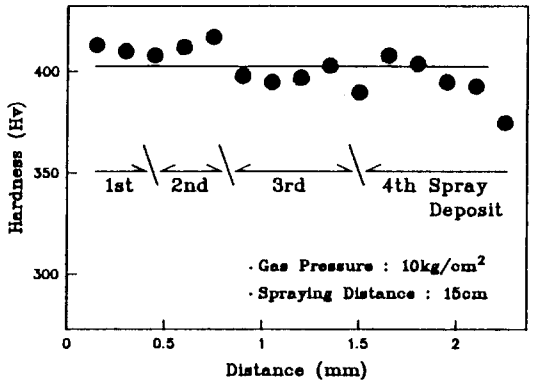

Fig.9 Variation of microhardness on multipass spray deposit with distance from the base metal

3.5. 용사층의 erosion 저항성

각종 용사조건에 따라 형성된 용사층의 erosion 저항성 test시 erosion 시간을 5분으로 하였다. Erosion후 측정된 무게 감량을 각 용사조건별로 상호 비교한 결과가 Fig. 10에 나타나 있다. 이에 의하면 용사가스압 10kg/cm², 용사거리 15cm의 조건하에서 형성된 용사층이 최대의 erosion 저항성을 나타냄을 알 수 있으며, 이는 이미 앞에서 검토한 바와 같이 이들 용사층의 조직이 미세하고

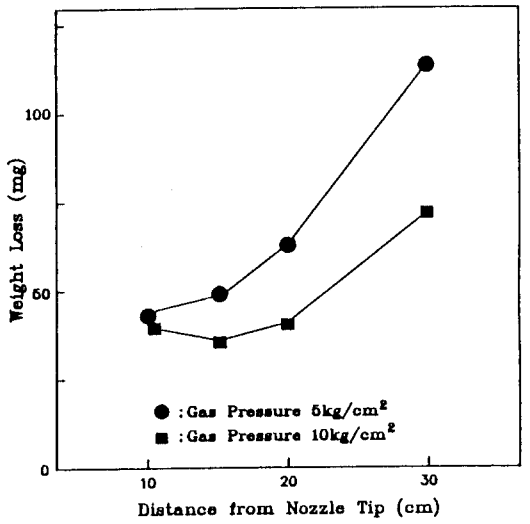

Fig.10 Results of the erosion resistance test with spraying distance and acceleration gas pressure

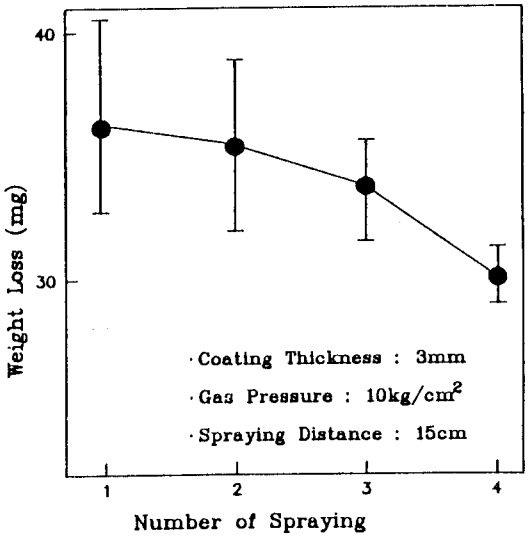

Fig.11 Results of the erosion resistance test for multipass spray deposits

porosity의 함유량도 적어 그 조직이 치밀함에 기인한다고 여겨진다. 그리고 용사거리가 이보다 멀어짐에 따라, 그리고 용사가스압이 낮아지면 용사층의 erosion 저항성은 급격히 감소됨을 알수 있다.

아울러 다층 용사방법에 의하여 형성된 용사층의 erosion 저항성 향상을 조사하기 위하여, 용사회수를 1회에서 4회까지 변화시켜 두께 3mm 정도의 용사층을 형성한 후 이들에 대한 erosion 저항성 시험을 행하였으며, 그 결과가 Fig. 11에 나타나 있다. 이것에 의하면 비록 오차범위는 크나 평균치를 감안하여 볼 때 다층 용사법에 의하여 형성된 용사층은 그 용사회수가 많을수록 즉 용사시 1회의 용사두께가 얇을수록 ersion 저항성이 좋아짐을 알수 있다. 이러한 현상은 이미 앞에서 고찰한 바와 같이 용사초기에 형성되는 용사층은 급속응고되어 그 조직이 미세화함과 더불어 강화상의 균일한 분포에 의하여 미소경도값이 높아짐으로, 매회 용사의 용사두께가 얇아질수록 그 용사층의 평균경도값이 상대적으로 높아지기 때문으로 여겨진다.

4. 결 론

Chrome boride가 함유된 hard facing용 Ni-base 합금 powder를 사용하여 oxy-fuel 용사법에 의하여 용사층을 형성함에 있어, 용사조건에 따른 용사입자의 속도변화 및 용사층의 미세조직과 기계적 성질을 검토한 결과 다음과 같은 결론들을 얻었다.

1) 용사거리에 따른 용사입자의 속도변화를 측정한 결과 이러한 속도변화는 수치 해석에 의한 속도예측과 잘 일치하였다.

2) 용사가스 압력이 10kg/cm², 용사거리가 15 cm 정도일 때 가장 치밀한 용사층을 얻을 수 있었다.

3) 용사층의 두께가 0.4mm이상 두꺼워지면 그 미세조직은 조대화되고 미소경도도 급감하며, 이에 따라 erosion resistance도 저하됨을 알 수 있었다.

4) 1회 용사층의 두께가 0.4mm 정도로서 다층 용사함에 의하여 초기의 미세조직과 미소경도값이 유지되는 두꺼운 용사층을 얻을 수 있었다.

후 기

본 연구는 문교부 1987년도 첨단공학(신소재분야)연구지원금에 대한 "Spray-cast deposition 공정에 의하여 제조된 합금강 preform의 조직과 성질" 연구의 일부로서 수행된 것이며, 문교부 당국의 지원에 심심한 사의를 표하는 바이다.

참고문헌

1) W.E.Ballard : Metal Spraying, Metallurgical Reviews, Vol.7,No.27,(1962),pp.283.
2) M.H.Kim and H.Jones : Effect of process variables in gas - jet atomization and production, Proc. 4th Int. Conf. On Rapidly Quenched Metals, (1981), p.85.
3) ASTM STANDARDS. : Conduction prosion tests by solid particle impingement using gas jet, Vol. 03.02 G-76-86, p.442.
4) A.A.Ranger and J.A.Nicholls : AIAA Journal, No.7,(1969), p.285.
5) R.G.Boothroyd : Flowing gas - solids suspensions, Chapman and Hall LTD, pp.21-24.
6) N.El-Kaddah : Heat transfer and fluid flow in plasma spraying, Metallurgical Trans. B, Vol. 15, Mar.(1984).
7) Jerzy K.Fiszdon : Melting of powder grains in a plasma flame, Int.J.Heat and Mass Transfer, Vol. 22, pp.749-761.
8) M.H.Kim and H.Jones : Proc. 5th Int. Conf. on Rapidly Quenched Metals,(1985), pp.139.