

Graphite-Ni계 분말의 제조 및 용사 코팅 특성에 미치는 공정변수의 영향

권준철 · 최문관^a · 김일호 · 홍태환 · 권순용 · 이영근 · 박순욱^b · 어순철*
충주대학교 신소재공학과/친환경 에너지 변환 · 저장소재 및 부품개발 연구센터,
^a단양석회석연구재단, ^b(주)세원하드페이징 금속기술연구소

Fabrication of Graphite-Ni Composite Powders and Effect of Thermal Spray Coating Parameters on Mechanical and Microstructural Properties

Joon-Chul Kwon, Mun-Kwan Cho^a, Il-Ho Kim, Tae-Whan Hong, Soon-Yong Kweon,
Young-Geun Lee, Soon-Wook Park^b and Soon-Chul Ur*

Dept. of Materials Science & Engineering, Chungju National University/Research Center for Sustainable ECo-Device & Materials, Chungju, Chungbuk, 380-702, Korea

^aDanyang Research Institute of Limestone & Advanced Materials, Danyang, Chungbuk, 395-903, Korea

^bMetals Research Institute, Sewon Hardfacing Co., Eumseong, Chungbuk, 369-854, Korea.

(Received March 10, 2005; Accepted April 11, 2005)

Abstract Graphite-Ni composite powders were synthesized by mechanical alloying(MA) and spray drying(SD). Fabricated powders as well as commercial graphite-Ni powders were thermally sprayed on mild steel substrates using high velocity oxygen fuel (HVOF) thermal spray process and flame thermal spray process. The effects of several process parameters on related properties in thermally sprayed coatings have been investigated and correlated with microstructures in this study. The results indicated that the desired properties can be obtained when commercial powders were applied using HVOF process, while coating properties in case of MA powder application were inferior to those in HVOF process in so far. However, it is suggested that property enhancement can be obtained if the fraction of hexagonal graphite phase can be increased in mechanically alloyed powders.

Keywords : Thermal-spray coating, Graphite-Ni powder, Mechanical alloying, Friction.

1. 서 론

자동차 변속기의 동기화 기어(synchronizer ring) 등은 고도의 내마모성이 요구되는 부품으로 통상 단조 또는 분말 야금법으로 제조한 황동 소지에 내마모 특성을 부여하기 위해 Mo계 분말의 용사 코팅을 하고 있다. 그러나, Mo계 용사재는 높은 재료비와 성능의 한계, 그리고 최근 환경 유해성의 문제가 대두되고 있어 대체 기술의 개발이 검토되고 있다. 대체 기술 개발의 일환으로 재료비가 상대적으로 저렴하며 윤활 및 내마모 특성이 우수한 그래파이트계 용

사 코팅에 대한 연구개발이 시작되고 있다^{1,2)}. 그래파이트계 용사코팅은 국내외적으로 아직 널리 활용되고 있지 않고 있으며, 용사 분말 제조 및 장비 제조사인 Sulzer-Metco 등에서 graphite-Ni 복합분말을 시판하고 있고, 공정 기술 방안이 제안된 바 있으나³⁾ 그 활용도 및 세부적인 용사 기술은 크게 미미하여 최신 동향을 분석하고 연구 방향을 설정하는데 어려움이 있었음을 밝힌다. 그래파이트 분말은 초고온에서 용사할 경우 증발되기 때문에, 중·저온에서의 용사를 실시하고 있으며 여기에 적절한 바인더가 필요하게 된다. 통상 Ni이 사용되고 있으며, 일부 외국산

*Corresponding Author : [Tel : +82-43-841-5385; E-mail : scur@chungju.ac.kr]

개발품의 조사결과 Cu 분말도 연구되고 있다.

용사 코팅은 화학조성, 분말 입도 및 용사건(spray gun) 종류에 따라 그 표면조직이 크게 영향을 받으며, 일반적으로 내마모성을 크게 하기 위하여는 코팅 결합력의 향상과 치밀조직을 얻는 것이 효과적이라고 알려져 있다.⁴⁻⁶⁾ 또한 HVOF, 플라즈마 용사(plasma thermal spray), 분말 화염 용사(flame thermal spray), 휴징(fusing) 등의 공정법과 각 공정별 화염의 온도, 용융 입자의 비산속도, 용사 분위기, power, 가스 배합율, 시편 회전 속도 등의 용사 조건 변수에 따라 그 특성이 크게 영향을 받기 때문에^{6,9)} 본 연구에 요구되어지는 코팅 조직과 품질에 적합한 용사방법을 예비 실험을 통해 선정하였다. 본 연구에서는 기준 자료로서 상용 그래파이트계 분말인 Ni-25graphite 분말(Sulzer-Metco 307NS series)의 특성(입도, 입도분포, 형상)을 분석하고, 대체 분말 합성의 일환으로 Ni-graphite 분말의 기계적 합금화와 분무 건조 등의 방법을 이용한 용사용 분말 개발을 시도하여 그 특성을 분석·비교하였다. 기계적 합금화 공정은 냉간 접합과 파쇄의 반복적인 과정으로 극미세 조직과 상의 균일화를 얻을 수 있는 신소재 고상상변태 가공기술의 하나로서, 과포화 고용체, 준안정 금속간 화합물, 비정질 재료 등의 비평형 상과 복합분말의 제조가 가능하다¹⁰⁾. 상용 분말 또는 기계적 합금화에 의해 합성한 그래파이트계 용사 분말을 HVOF, 분말 화염 용사 등을 이용하여, 연료량, 용사거리 등의 공정변수를 달리하여 용사한 다음, 물성 분석(표면, 조직정도, 접착강도)을 실시하였다. 이에 각각의 소재 및 공정 변수에 따르는 결과를 비교, 분석하였다.

2. 실험 방법

상용 그래파이트계 분말 순도 99.9 wt%의 Ni-25graphite 분말(Metco 307NS series)의 특성(입도, 입도분포, 형상)을 주사전자 현미경(Hitachi S-2400)과 레이저 입도 분석기(Horiba LS 300)를 사용하여 분석하였다. 대체 분말 제조의 일환으로 순도 99.8% 이상의 200 mesh급 Ni-20graphite 분말을 48시간의 볼밀링에 의해 혼합분말을 제조하였고, attrition mill을 이용하여 48시간 동안의 기계적 합금화와 분무 건조 방법을 이용하여 용사용 분말 개발을 시도하였다. 기계적 합금화 공정은 Szegavari type의 고에너지 어트리터를 사용하여 Ar 분위기 하에서 최대 회전속도 400 rpm으로 100시간 동안 실시하였다. 이때 일회 분말 장입량은 50 g으로 하였고, 직경 5 mm의 지르코니아 볼을 사용하였으며 볼과 분말의 무게비는 10:1로 하였다.

상용 분말 또는 기계적 합금화 그래파이트계 용사 분말을 HVOF(Tafa model JP-5000), 분말 화염 용사(Metco type 5P-II) 등의 공정을 이용하여, 표 1과 같이 연료량, 용사거리 등의 공정변수를 달리하여 용사하였다. 코팅전, 모재는 표면적을 넓혀 용착이 잘 되기 위해 grit blasting공정을 실시하였으며 용사법의 효율을 극대화시키기 위하여, 화염의 온도, 용융입자의 비산속도, 용사 분위기, 가스 배합율, 시편 회전 속도 등의 용사 조건 변수를 검토하여 최적 공정 조건을 사용하였다. 용사시편에 대한 제반 기계적 성질 평가를 위해, rotor-on-disk 방식의 습식마모시험, ASTM C633에 의한 접착강도시험 및 미세경도시험(Hv)을 실시하였고, 상 및 조직분석을 위해, X선 회

Table 1. Thermal spray process parameters used

Parameters	Processes	
	HVOF	Flame Thermal Spray
Oxygen Pressure (psi)	150	30
Oxygen Flow (scfh)	1400	1400
Fuel Pressure (psi)	434	434
Fuel Flow (gph)	5.0, 5.2, 5.5, 5.8	5.0
Spray Distance (mm)	380	80, 100, 120, 140, 160
Spray Angle (degree)	90	90
Specimen Moving Rate (B/E/sec)	1000	500
Acetylene (psi)	-	30
Argon (psi)	-	30

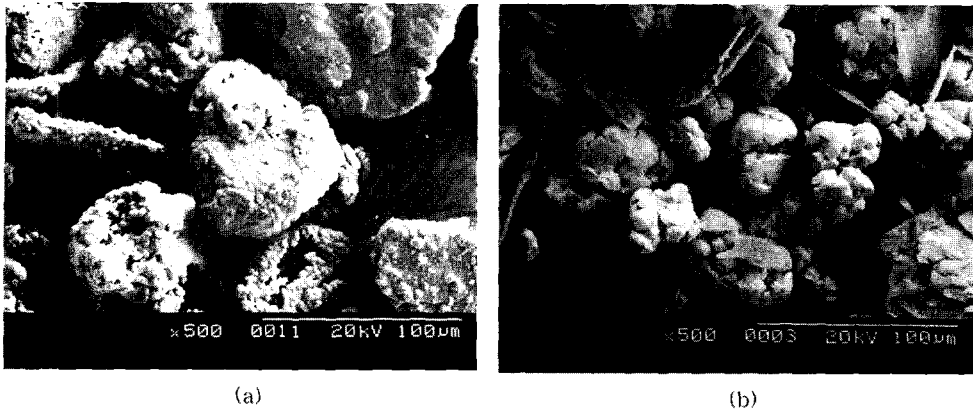


Fig. 1. SEM micrograph of Ni-graphite powders; (a) Ni-25graphite powders (Metco 307NS), (b) Mechanically alloyed and spray dried (MASD) Ni-20graphite powders.

절시험(XRD), 주사전자현미경(SEM) 관찰 및 에너지 분산 원소분석(EDS)을 실시하였다. 접착강도시험에서 시편접착을 위한 접착제는 Gatan G1-epoxy를 사용하였으며 160°C에서 1시간 curing 시킨 후 별도의 지그(jig)를 제작하여 접착강도시험을 실시하였다. 습식 마모시험은 SUS 304재질의 rotor(직경 45.86 mm, 두께: 3.58 mm)를 사용하였으며, 회전속도 250 rpm, 마모하중 9.8N, 마모거리 196.2 m로 setting 하여, 각 10분간씩 작동하였다. 내마모성은 비마모량(specific wear loss; W)으로 나타내었으며, 관련 계산식은 식(1)에 나타내었다

$$W = \frac{Bb^3}{8\gamma Pl} (\text{mm}^3/\text{Nm}) \quad (1)$$

여기에서 B = rotor 두께(mm), γ = rotor 반경 (mm), b = 마모흔의 길이(mm), P = 시험 하중(N), l = 마모거리(mm)이다.

각각의 as-thermal sprayed 시편의 조도시험(roughness test)은 Mitutoyo Surf-tester SJ-301을 사용하여 JIS 1994의 방법으로 측정하였으며, 이때 시험거리(evaluation line)는 7.5 mm, 주사속도(scan speed)는 0.5 mm/sec으로 설정하여 실시하였다.

3. 실험결과 및 고찰

상용 Ni-25graphite 분말(99.9 wt%, 325 mesh)의 입도분포는 레이저입도분석 결과 평균입도 41 μm 로

나타났으며, 그림 1(a)와 같이 SEM/EDS 분석 결과 그래파이트 입자에 미세 Ni 분말이 코팅된 것을 확인할 수 있었다. 대체 용사분말의 합성을 위한 시도로서 순도 99.8%이상의 200 mesh급의 Ni과 그래파이트 분말을 Ni-20 graphite(wt.%)의 조성이 되도록 혼합하여 48시간 동안 볼 밀링을 실시하여 균일 혼합을 유도하였으나, Ni과 그래파이트의 밀도 차이로 인해 균일한 혼합이 이루어지지 않고 Ni의 침강이 발생하여 용사에 적용할 수 없었다. 균일 분산을 위해 기계적 합금화(Mechanical Alloying; MA) 공정을 고려하였으며 Ni-20graphite 조성의 혼합 분말을 attrition mill을 이용하여 48시간 동안의 기계적 합금화 공정을 실시하였다. 그래파이트와 Ni은 공정시스템으로 기계적 합금화에 의해 새로운 상의 합성은 불가하며, 본 연구에서는 미세혼합을 유도하고자 하였다¹¹⁾. As-milled 분말은 비중 차이에 의한 Ni과 그래파이트의 분리를 방지하고, 용사시의 이송효율을 증대시키기 위해 분무 건조(spray drying)법을 이용하여 용사용 분말을 제조하였다. 그림 1(b)에 나타낸 바와 같이 기계적 합금화 분말의 분무 건조에 의해 평균입도 6 μm 의 조립 분말을 얻을 수 있었으며, 그래파이트와 Ni은 X선 회절시험 결과 그림 7에 나타난 바와 같이 상호 미세 혼합된 것으로 추정되었다.

Metco 307 NS 분말을 HVOF 용사를 실시하였고 연료량(5.0, 5.2, 5.5, 5.8 gph)에 따르는 단면조직을 그림 2에 나타내었다. 연료량 5.0 gph에서의 용사두께는 다소 작게 나타났으나, 5.2 gph이상에서는 50 μm 이상의 두께를 얻을 수 있었다. SEM/EDS 분석결과,

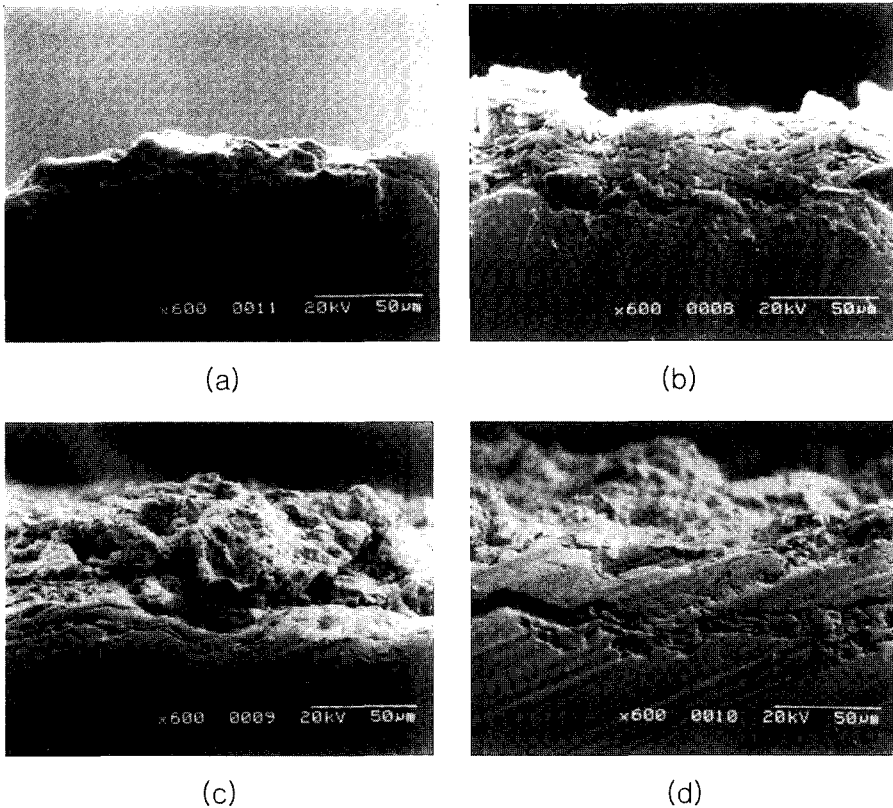


Fig. 2. SEM micrographs of HVOF thermal sprayed sections using 307NS powders; (a) fuel flow 5.0 gph, (b) fuel flow 5.2 gph, (c) fuel flow 5.5 gph, (d) fuel flow 5.8 gph.

그림 2의 용사 코팅 부위에서 Ni과 그래파이트 상의 개별 확인은 어려웠으며, 이는 HVOF 공정 특성상 두 조성이 미세 균일 분산된 것으로 추정되었다.

또한 Metco 307 NS 분말의 화염 용사(FS)를 실시하였으며, 이는 용사거리의 영향이 가장 크므로 용사거리(80, 100, 120, 140, 160 mm)의 변수를 설정하여 용사하였다. SEM에 의한 미세 조직 관찰 결과를 그림 3에 나타내었다. 분말 화염 용사시 수동으로 gun을 이송하여 용사하였으므로 일정 두께의 조절에는 어려움이 있었으며, 균일한 두께의 조절을 위하여는 로봇 이송장치에 의한 공정수행이 필요하리라 판단되었다. 전반적으로 500 μm 이상의 코팅 두께를 얻을 수 있었으며, 국부적인 후막 생성부는 폴리싱 처리를 실시하여 두께를 보정하였다. EDS 분석결과, 그림 8의 용사 코팅 부위에서 검은 부분은 그래파이트, 흰 부분은 Ni로 판명되었으며, Ni과 그래파이트가 균일하게 분산되어 있는 것을 알 수 있었다.

기계적 합금화와 분무 건조법으로 제조한 Ni-20graphite 분말을 307 NS 분말과 같은 공정변수 하에서 화염 용사법으로 용사하였으며, 용사 단면의 조직을 그림 4에 나타내었다. 용사거리(80, 100, 120, 140, 160 mm)에 따르는 영향은 수동 작업의 특성상 일정 두께의 조절에는 어려움이 있었으나, 전반적으로 200-300 μm 내외의 코팅 두께를 얻을 수 있었으며, 용사거리가 커질수록 불균일한 코팅이 이루어진 것을 알 수 있었다. EDS 분석에 의한 Ni과 graphite의 분산상의 조사 결과, 그림 4의 용사 코팅 부위에서 검은 부분은 그래파이트, 흰 부분은 Ni이며, 그래파이트 군집체의 크기가 미세해진 것을 알 수 있었다. 이는 다음의 X선 회절 시험결과에서 논의 하였듯이, 단순 분말 혼합 용사의 경우 Ni과 그래파이트의 밀도 차이에 의해 조대 그래파이트 군집체가 형성될 수 있으나, 본 연구에서는 기계적 합금화에 의해 그래파이트 군집체의 크기가 매우 미세해

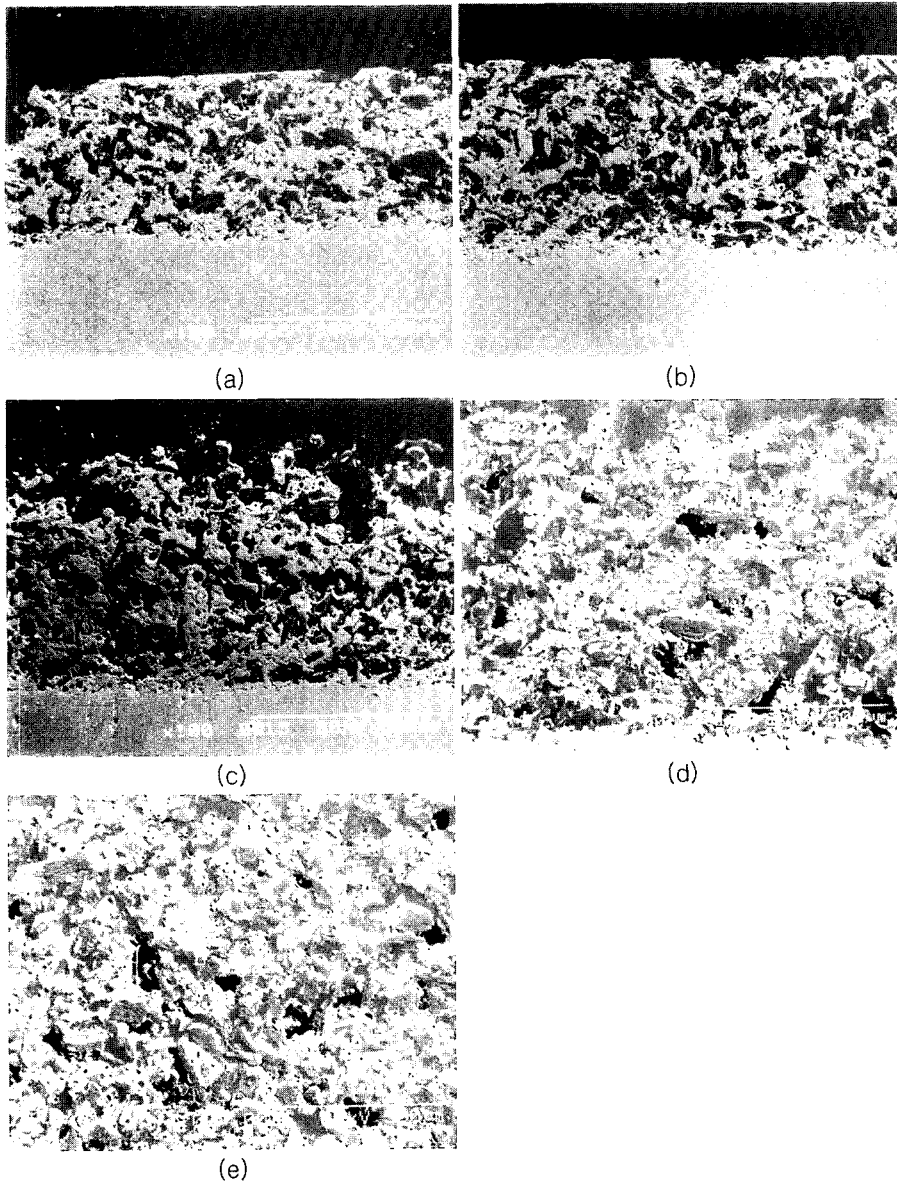


Fig. 3. SEM micrographs of flame thermal sprayed sections using 307NS powders; (a) spray distance 80 mm, (b) spray distance 100 mm, (c) spray distance 120 mm, (d) spray distance 140 mm, (e) spray distance 160 mm.

진 때문으로 추정되었 있었다¹⁰⁾.

각 공정별, 분말별 용사 코팅 상의 종류와 개략적인 분율의 조사를 위해 X선 회절시험을 실시하였으며, 결과를 그림 5-7에 도시하였다. 그림 5에서 307 NS 분말의 HVOF 용사의 경우 Ni 상과 유효작용을 하는 hexagonal 구조의 그라파이트 상(2H)^{1,2)}이 혼재되어 있음을 알 수 있으며, 연료량의 증가에 따라,

그라파이트 상의 분율이 증가하였다. 이는 연료의 증가에 따라 온도가 증가하게 되어 용점이 상대적으로 낮은 Ni의 증발량이 증가된 때문으로 사료되었다. 향후 내마모 특성 향상을 위하여는 연료량의 증가를 고려하여야 할 것으로 판단되었다.

307 NS 분말의 화염 용사의 경우에는, 그림 6에 나타난 바와 같이 용사거리가 80 mm 일때 Ni 상과

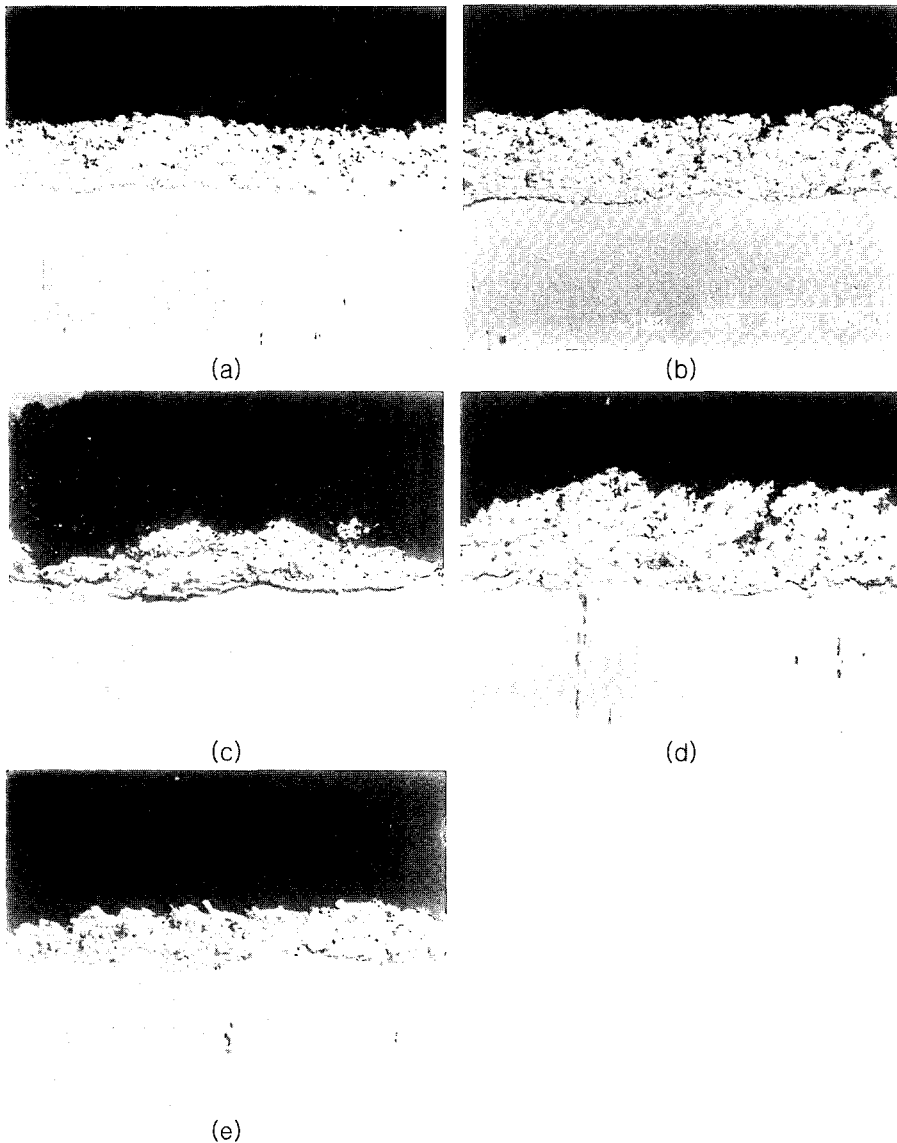


Fig. 4. SEM Micrographs of flame thermal sprayed sections using MA and spray dried Ni-20graphite powders; (a) spray distance 80 mm, (b) spray distance 100 mm, (c) spray distance 120 mm, (d) spray distance 140 mm, (e) spray distance 160 mm.

hexagonal 구조의 그래파이트 상(2H)으로 구성되어 있으나, 용사거리가 커짐에 따라 hexagonal 구조의 그래파이트 상(2H)이 rhombohedral 상인 그래파이트 (3R)으로 분해·변태되고, 이때 Ni의 피크가 왼쪽으로 이동되면서 피크의 폭확장(peak broadening)이 생기는 것을 알 수 있는데, 이는 탄소 고용에 의한 격자상수 증가에 기인한 것으로 추정되었다. 이에 관하여 아직 유사한 연구가 발표된 바 없고, 또한 적절한

참고자료가 부족하여 이론적 접근을 하기에는 다소 무리가 있으나, 용사거리 증가에 따라 용융 복합분말에서 비중차이가 큰 Ni이 그래파이트와 분리되어 일부는 비산되어지고, 해리 그래파이트는 상대적으로 큰 온도구배의 영향에 의해 상변화와 함께 무리한 탄소고용을 일으킨 때문으로 추정되었다. 또한 일부 미세 피크들은 용사 후 두께 조정시 잔여 불순물의 의한 것으로 확인되었다.

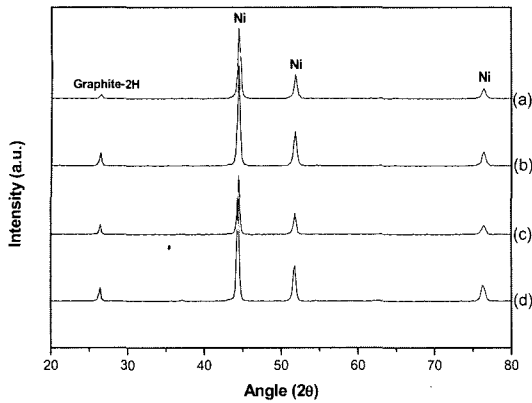


Fig. 5. XRD patterns of HVOF thermal sprayed Ni-75 graphite coating (307NS); (a) fuel flow 5.0 gph, (b) fuel flow 5.2 gph, (c) fuel flow 5.5 gph, (d) fuel flow 5.8 gph.

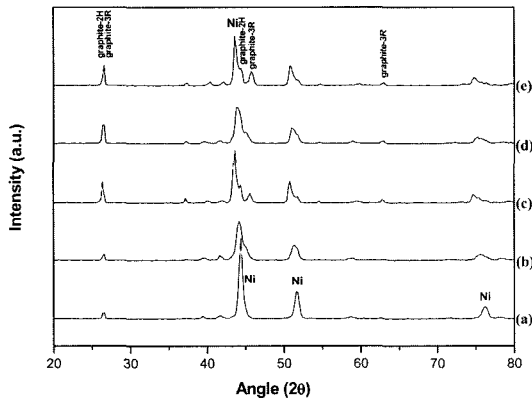


Fig. 6. XRD patterns of flame thermal sprayed Ni-75 graphite coating (307NS); (a) spray distance 80 mm, (b) spray distance 100 mm, (c) spray distance 120 mm, (d) spray distance 140 mm, (e) spray distance 160 mm.

기계적 합금화 및 분무 건조된 분말의 화염 용사의 경우에는, 그림 7에 나타난 바와 같이 Ni 상과 rhombohedral 그래파이트상이 혼재되어 있으며, hexagonal 그래파이트상은 그 분율이 매우 작고 용사 거리가 커짐에 따라 점차 감소하는 것을 알 수 있었다. 이 또한 아직 유사한 연구와 적절한 참고자료의 부족으로 인해 이론적으로 접근하기에 어려움이 있으나, 기계적 합금화 분말의 층상 나노 미세조직 특성상¹⁰⁾, 용사거리 증가에 따르는 구성원소간 비산의 차이가 크게 감소될 수 있고, 이에 따라 307 NS 분말의 화염 용사와는 달리 해리 그래파이트(3R)의 상 분해와 탄소 고용이 크게 감소한 것으로 추정되었다.

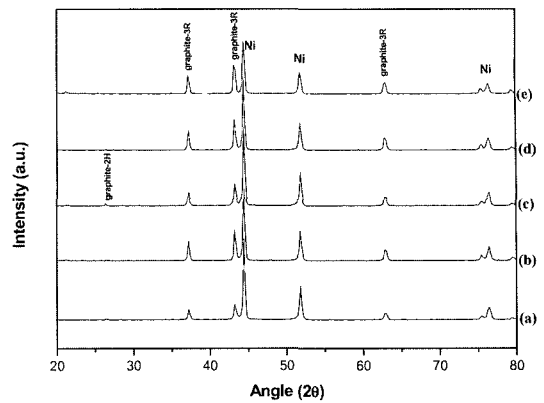


Fig. 7. XRD patterns of flame thermal sprayed coating using MA and spray dried Ni-20graphite powders; (a) spray distance 80 mm, (b) spray distance 100 mm, (c) spray distance 120 mm, (d) spray distance 140 mm, (e) spray distance 160 mm.

Rhombohedral 상의 그래파이트 상은 준안정상으로서 hexagonal상과는 달리 결정구조 특성상 윤활 특성과 내마모 특성이 그다지 좋지 않을 것으로 예상할 수 있는데, 이는 이후에서 논의한 바와 같이 마모 시험을 통해 확인할 수 있었다. 그러나 이 결과들은 추후 기계적 합금화 공정이 그래파이트계 복합분말의 제조에 있어 유용한 가능성 있으며, 다만 내마모 특성 향상을 위하여 hexagonal 그래파이트의 생성 및 분산이 필요한 바, 추가 연구가 진행되어야 할 것으로 사료되었다.

각 공정별, 분말별 용사 코팅의 기계적 성질 평가의 일환으로 미세경도시험을 실시하였으며 결과를 표 2에 나타내었다. 전반적인 공정별 경도는 307 NS 분말의 HVOF 용사 코팅이 가장 우수한 것으로 나타났다. 이는 HVOF 용사 공정의 특성상 높은 용사압력에 의한 우수한 접착강도 때문으로 추정되었다. 307 NS 분말의 HVOF 용사코팅의 경우 연료비가 증가함에 따라 경도가 증가하며, 연료량 5.8에서 최대치를 보였다. 307 NS 분말과 MASD 분말의 화염 용사 코팅의 경우에는 용사거리에 따르는 정도 변화의 뚜렷한 경향은 없었으며, 다만 307 NS 분말 코팅의 경우 용사거리 160 mm에서 최대치를 나타냈다. 경도시험 결과와 비교 검토를 위해, 각 공정별, 분말별 용사 코팅 시편에 대한 접착강도시험을 ASTM-C633방법에 의해 실시하였다. 접착강도 시험시 국부적으로 코팅층이 분리되었는데 이는 에폭시 접착제

Table 2. Microhardness (Hv) measurement results on various thermal sprayed coatings

Ni-25 graphite (Metco 307 NS)		Ni-25 graphite (Metco 307 NS)		Ni-20 graphite (MASD)	
HVOF		Flame Thermal Spray		Flame Thermal Spray	
Fuel Ratio (gph)	Average Hv	Spray Distance (mm)	Average Hv	Spray Distance (mm)	Average Hv
5.0	204.8	160	270.8	160	173.3
5.2	219.7	140	109.9	140	228.4
5.5	222.5	120	149	120	199.5
5.8	396.5	100	226	100	226.2
		80	136.7	80	156

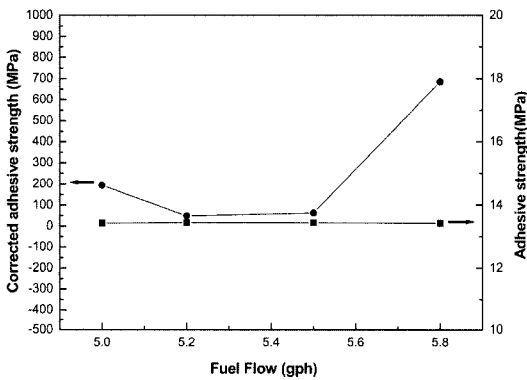


Fig. 8. Adhesive strength as a function of fuel flow rate in HVOF thermal sprayed 307 NS powder coatings.

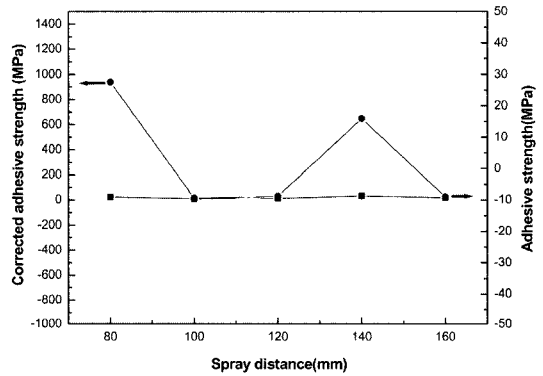


Fig. 10. Adhesive strength as a function of spray distance in flame thermal sprayed MA & spray dried powder coatings.

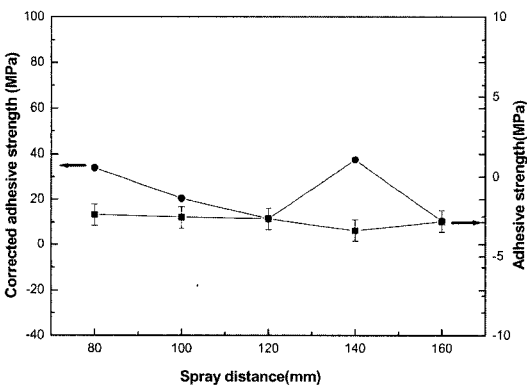


Fig. 9. Adhesive strength as a function of spray distance in flame thermal sprayed 307 NS powder coatings.

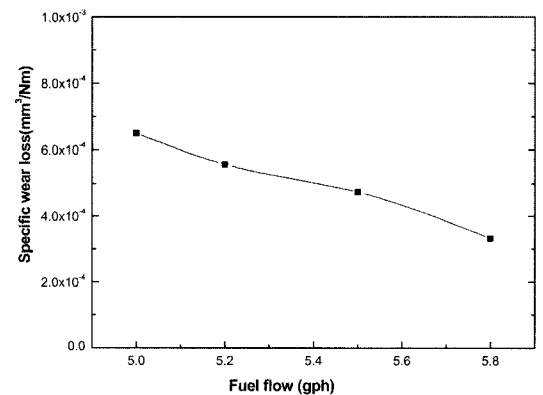


Fig. 11. Specific wear loss as a function of fuel flow rate (gph) in HVOF thermal sprayed 307 NS powder coatings.

면 또는 코팅 접합의 불균일에 의한 것으로 사료되었다⁷⁾. 응력계산을 위한 단면적 계산시 전체 면적 대비 접합강도뿐 아니라, 국부적으로 코팅층이 분리된 실제 단면적을 사용하여 보정계산 하여 비교하였다⁷⁾. 각 공정별, 분말별 용사코팅의 접착강도시험 결과를

그림 8-10에 나타내었다. 그림 8과 같이, 307 NS 분말의 HVOF용사의 경우 연료량의 증가에 따라 접착강도가 증가하고 있으며, 표면 관찰 결과 계면 분리 면적은 상대적으로 작아지는 것을 알 수 있다. 순수 또는 보정 접착강도 모두 연료량 5.8 gph에서 가

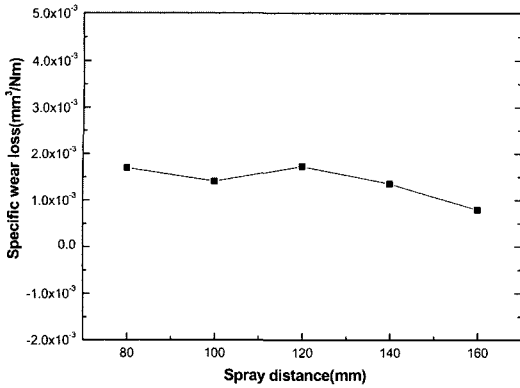


Fig. 12. Specific wear loss as a function of spray distance in flame thermal sprayed 307 NS powder coatings.

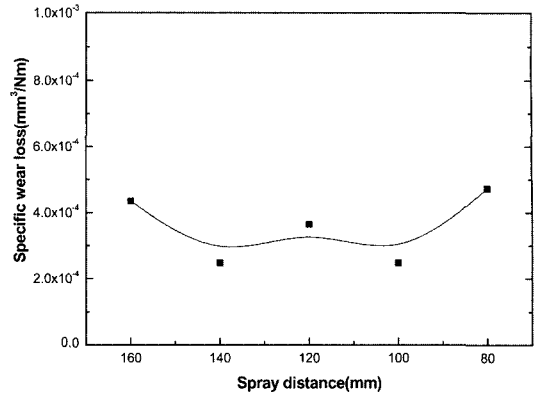


Fig. 13. Specific wear loss as a function of spray distance in flame thermal sprayed MA & spray dried powder coatings.

장 우수한 것으로 판단되었다. 그림 9-10에 나타난 바와 같이, 307 NS 분말과 MASD 분말의 화염 용사의 경우 모두 HVOF 용사에 비해 매우 낮은 접착 강도를 보이고 있으며, 이는 낮은 압력의 화염 용사의 공정 특성 때문인 것으로 판단되었다. 또한 화염 용사의 경우는 경도값의 변화와 마찬가지로 용사거리에 따르는 특징적인 강도변화의 경향은 없었다. 테스트 후의 계면 분리 면적은 모든 시편에서 50%를 넘는 것으로 나타나 기계적 강도와 접착강도가 HVOF공정에 비해 매우 낮은 것을 알 수 있었다.

또한, 각 공정별, 분말별 용사 코팅의 내마모 특성 평가를 위해 rotor-on disk wet wear 시험을 실시하였으며 그림 11-13에 내마모 시험 결과를 나타내었다.

그림 11에 나타난바와 같이, 307 NS 분말의 HVOF 용사의 경우 연료량의 증가에 따라 비마모량이 점진적으로 작아지는 것을 알 수 있으며, 이는 접착강도 및 경도의 증가, hexagonal 구조의 그래파이트의 안정성 및 상분율의 증대에 기인한 것으로 판단된다. 반면, 화염 용사의 경우에는, 그림 12-13에 나타난 바와 같이 낮은 접착강도, 준안정상의 그래파

Table 3. Surface roughness measurement results on various thermal sprayed coatings

Powder	Process	Parameter Variables		Ra(μm)	Rz(μm)
		Fuel flow (gph)	Spray distance (mm)		
307 NS (Ni-25graphite)	HVOF	5		8.38	34.95
		5.2		9.48	38.04
		5.5		16.17	60.55
		5.8		16.63	60.10
307 NS (Ni-25graphite)	Flame Thermal Spray		160	11.86	48.66
			140	14.41	57.91
			120	9.98	47.54
			100	11.5	14.1
			80	11.69	48.42
MASD (Ni-20graphite)	Flame Thermal Spray		160	24.04	76.4
			140	21.54	84.81
			120	22.43	90.2
			100	17.17	78.04
			80	20.21	79.06

이트상의 혼재 등에 의해 초기 내마모량이 HVOF 용사법에 비해 상대적으로 크게 나타나, 내마모 특성이 낮은 것으로 판단되었다. 화염 용사는 전반적으로 용사거리에 따른 물성 변화의 상관관계를 추정하기 어려웠으나, 307 NS 분말의 화염 용사의 경우에는 그림 12와 같이 용사거리 160 mm에서 최소의 마모량을 나타내었다. 또한 전반적인 공정별 내마모 특성은 307 NS 분말의 HVOF, MASD 분말의 화염 용사, 그리고 307 NS 분말의 화염 용사의 순으로 그 우수성을 평가할 수 있었다.

공정별 표면조도(Ra 및 Rz)를 측정하여 표 3에 제시하였다. 전반적으로 307 NS 분말의 HVOF용사의 경우 조도는 Ra 8-16, 307 NS 분말의 화염 용사의 경우에는 중심선 평균거칠기(Ra) 11-15내외, 그리고 기계적 합금화 및 분무 건조된 분말의 화염 용사의 경우에는 Ra 18-24 내외로 초기 분말의 종류에 따라 다소의 차이가 있음을 알 수 있었다. 화염 용사의 경우 용사 공정 변수의 변화에 따르는 연관성은 희박한 것으로 조사되었으나, 307 NS 분말의 HVOF용사의 경우 연료량의 증가에 따라 조도가 커지는 것을 알 수 있었다. 이에 대한 정확한 원인의 추정은 어려우나, 연료량의 증가에 따르는 온도의 영향에 의한 것으로 추정되었다.

4. 결 론

그라파이트계 상용 분말(Metco 307 NS; 75Ni+25graphite)과 대체 분말소재로서 기계적 합금화 공정 및 분무 건조법으로 제조한 Ni+20graphite 분말을 HVOF 및 화염 용사법으로 용사하여, 용사 후 특성, 상변화, 미세조직 등의 특성을 평가하였다.

1. 그라파이트계 상용 분말(Metco 307 NS; 75Ni + 25graphite)의 HVOF용사의 경우 연료량이 증가할수록 hexagonal구조의 그라파이트 상분율이 증가하였고 내마모 특성, 접착강도, 경도가 향상되었으며, 표면조도는 증가하는 현상을 보였다.

2. 그라파이트계 상용 분말(Metco 307 NS; 75Ni + 25graphite)의 화염 용사의 경우 Ni 상과 hexagonal 그라파이트 상이 혼합되어 있으나, 용사거리가 커짐에 따라 hexagonal 구조의 그라파이트 상이 rhombohedral 상으로 분해되고, 이와 함께 탄소 고용에

의한 Ni peak의 이동을 확인할 수 있었다. 이는 용사거리 증가에 따라 비산도가 커지고, 보다 큰 온도 구배의 영향에 의해 상변화와 함께 무리한 탄소 고용을 일으킨 때문으로 추정되었다. 용사거리의 증가에 따른 접착강도에는 큰 변화가 없었고, hexagonal 그라파이트의 해리에 의해 내마모 특성은 다소 감소되었음을 알 수 있었다.

3. 기계적 합금화 및 분무 건조된 분말의 화염용사의 경우에는, 주요 상으로서 Ni과 rhombohedral상이 혼합되어 있고 적은 양의 hexagonal 그라파이트 상이 포함되어 있으며, hexagonal 그라파이트 상분율은 용사거리가 커짐에 따라 점차 감소하였다. 그러나 307NS 분말의 화염 용사의 경우에는 달리 용사거리가 커짐에 따라 상분해가 일어나는 현상은 크게 나타나지 않았는데, 이는 기계적 합금화 공정의 특성상 Ni과 그라파이트의 층상 복합조직이 잘 발달된 때문으로 해석되었다. 또한 용사거리에 따르는 경도 변화, 접착강도, 조도, 내마모 특성에 뚜렷한 상관관계는 없는 것으로 조사되었다.

참고문헌

1. E. Celik and E. Avcı : Surface and Coatings Technology, **116-119** (1999) 1067.
2. Y. Enomoto and T. Yamamoto: Tribology Letters, **5**(1) (1998) 13.
3. Hans-Walter Schlaepfer : Sulzer Technical Review, **1** (2005) 4140.
4. S. M. Meier, D. K. Gupta and K. D. Sheffler : JOM, **Mar.** (1981) 50.
5. S. Y. Hwang, B. G. Sung and M. C. Kim: J. of Korean Powder Metall. Inst., **3**(2) (1996) 79.
6. D. S. Suh: Monthly Ceramics, **5** (1992) 72.
7. S. C. Ur, J. I. Lee and Y. G. Lee: J. of Korean Powder Metall. Inst., **7**(2) (2000) 63.
8. Y. G. Lee: Monthly Ceramics, **5** (1992) 68.
9. P. Vouristo, K. Niemi, A. Makela, and T. Matyla: Thermal spray coatings: Research, Design, and Applications, Proc. of 5th Nat'l Thermal Spray Conf., ASM Int. (1993) 173.
10. J. S. Benjamin: Met. Trans, **1** (1970) 1943.
11. Smithells Metals Reference Book, W. F. Gall and T. C. Totellmeier (Eds.), Elsevier Science, Holland (2004), 11.