

## 제철 분진 슬래그를 이용한 열용사 코팅 막의 물리화학적 특성분석

이영석 · 정성기 · 유승화 · 조규진<sup>†</sup>

순천대학교 화학공학과, 나노기술센터  
540-742 전남 순천시 매곡동 315  
(2002년 2월 18일 접수, 2003년 4월 12일 채택)

## Physicochemical Characterization for Thermal Spray Coated Films from Steel Powder Slags

Young-Seak Lee, Sung Gi Jung, Seung Hwa Yoo and Gyou Jin Cho<sup>†</sup>

Department of Chemical Engineering and Nanotechnology Center, Sunchon National University,  
315 Maegok-dong, Sunchon, Chonnam 540-742, Korea  
(Received 18 February 2002; accepted 12 April 2003)

### 요 약

제철소 제강공정 부산물인 분진은 탄소와 산화철이 전체의 90 wt%를 차지하는 미세분말로서, 이를 환원하면 카본과 철이 주성분이 된다. 본 연구에서는 이들 환원 분진을 고부가가치 재료인 열용사 코팅 분말로 사용하여 열용사 코팅 후 코팅 막의 물리 화학적 특성을 조사하였다. 환원 분진은 입도별로 65-90  $\mu\text{m}$ , 90-106  $\mu\text{m}$ 와 106-125  $\mu\text{m}$  입자들로 분리하여 열용사를 동일한 조건하에서 수행하였으며, 이 때 106-125  $\mu\text{m}$ 의 입도를 지닌 환원 분진을 이용한 열용사 증착 효율이 가장 우수하였으며, 코팅 막의 미세구조를 XRD와 XPS를 이용하여 조사하였고 코팅 막의 접착강도 및 내 부식성을 조사하였다.

**Abstract** – The steel powder slags, consisted of 90 wt% of carbon and iron oxides, can be simply reduced to carbon and iron. In this research, we studied the physicochemical characteristics of thermal spray coated films prepared using the reduced powder slags as a highly valuable powders for the thermal spray coatings. After the reduced powder slags were divided into three fractions(65 to 90  $\mu\text{m}$ , 90 to 106  $\mu\text{m}$ , and 106 to 125  $\mu\text{m}$ ) based on the particle sizes, we carried out the thermal spray coating using each samples under the same thermal spray coating condition and found out that the particles with the sizes of 106 to 125  $\mu\text{m}$  had the best deposition efficiency. The microstructures of the coated films were investigated using XRD and XPS, and the adhesion strength and corrosion resistance were studied as well.

**Key words:** Thermal Spray Coating, Reduced Powder Slags, Thermal Spray Coated Film

### 1. 서 론

제철산업은 그 제조 공정의 특성상 대량의 원료와 에너지를 소비할 뿐만 아니라, 다양한 종류의 부산물과 폐기물을 다량으로 발생시켜 주 제품인 철강의 약 65%에 이르고 있다. 그러나 이러한 철강 폐기물(slag)은 철, 탄소, 석회석 등 재활용이 가능한 유효자원을 다량함유하고 있음에도 불구하고, 국내 제철소의 제강공정에서 발생하는 고형 부산물 중 분진 형태의 부산물은 다른 고형 폐기물에 비하여 재활용도가 현저히 낮고 또한 폐기 및 야적이 용이하지 않아 대부분 해안에 매립 폐기되고 있다. 이들을 단순매립으로 처리하는 것은 귀중한 자원과 에너지를 낭비할 뿐만 아니라 2차 공해를 유발할 우려가 있다. 따라서 에너지 절감 및 환경보존 문제 차원에서 이러한 분진 슬래그의 재활용과 이들 분진들을 이용한 고부가 가치의 소재 생산 연구가 일본, 독일 및 국내에서 활발히 수행되고 있다[1-3]. 현재 주가 되는 재활용법으로는 다양한 조성을 지닌 분진들 중 평균적으로 탄소 또는 흑연 형태의 함유량이 50 wt%

정도이므로 이들 성분을 다른 성분들과 부유선광법을 이용하여 분리해냄으로써 탄소 또는 흑연 구성물의 조성을 높여 사용하는 방법과[4] 이들 분진 조성물들 중 약 40 wt% 정도를 차지하는 산화철 형태를 환원하여 분철과 탄소의 복합재료 형태로 하여 마찰재료 이용하는 연구가 수행되었으며, 그 결과로서 현재 자동차 브레이크 패드 제조에 이용되고 있다[5]. 그러나 이러한 형태의 재활용은 현재 평균적으로 조강 톤당 평균 16 kg 정도가 발생하는 분진의 10%정도에 그치고 있으며 경제적으로도 그 효율성이 매우 미약한 상태라 할 수 있다. 따라서 이들 분진을 단순 공정을 통하여 고부가가치의 소재로 변환시킬 수 있는 연구는 자원 재활용과 환경 오염물 저감차원에서 매우 필요한 실정에 있다.

본 연구팀은 분진을 환원시킨 후 분진의 주조성이 Fe(40 wt%)와 C(50 wt%)인 것을 기초로 하여 이들을 각각의 조성으로 선별하는 것보다는 용융하여 합금 형태로 이용하는 것이 보다 경제적인 수 있다는 점에 착안하여, 환원된 분진을 열용사 코팅 재료로 이용 가능한지를 조사하고자 하였다. 열용사 코팅은 선 또는 분말 재료로부터 이들 재료를 용융하고 방울 형태로 선택된 표면에 충출시켜 필름으로 성장시키는 기술로서, 응용분야가 자동차, 항공, 우주산업 분야, 장식품, 부식 방지, 공업용 롤러, 반도체, 터빈 및 교량 등에 이르기까지 전 산업분야에 다양

<sup>†</sup>To whom correspondence should be addressed.  
E-mail: gcho@sunchon.ac.kr

하게 분포되어있으며[6], 잠재적 수요가 크다. 따라서 환원된 분진을 간단하게 열용사 코팅재료로 활용한다면, 산업폐기물을 응용범위가 매우 큰 고부가가치의 재료로 변환시킬 수 있다.

열용사 코팅은 40년 전에 처음 시도된 후로 미국, 일본 및 유럽 선진국에서 최근 10년간 괄목할 성장을 하여왔으며 현재 광범위하게 사용되고 있다. 최근의 연구 동향을 보면 비교적 화염 속도와 온도(3,000 °C)가 낮은 열용사 방법은 점차 연구대상에서 멀어지며 High Velocity Oxy-Fuel(HOVF) 방법을 이용하여 가스의 가속도를 급격히 증진시켜 음속 4배까지 낼 수 있는 특별한 토치 개발 등으로 연구가 집중되고 있다[7]. 이 때 HOVF 방식으로 기관에 충돌한 원자들은 매우 얇은 막을 형성할 수 있게 된다. 또한 Two-wire Electric Arc 방법[8]과 Plasma 및 진공 Plasma[9, 10] 방법들이 활발히 연구되고 있다. 전체적으로 보면 열용사 코팅은 토치 디자인과 응용의 두 큰 분야로 현재 연구되고 있으며, 재료 분야에서 열용사 분말 재료에 관한 연구는 미세한 크기의 분말 생성에 중점을 두고 있으며 이를 통하여 극미세 박막을 제조하는 연구가 활발히 진행되고 있다[11]. 그러나 아직까지 전 세계적으로 산업 폐기물인 제철 분진을 이용한 열용사 코팅은 보고 된 바 없다.

따라서 본 연구에서는 우선 기초적인 열용사 코팅장치를 이용하여 환원된 제철 분진을 열용사 코팅재료로 이용할 수 있는 기초적 근거를 마련하고자, 환원 분진 입자들을 크기별로 선별한 후 열용사 코팅을 수행하고 생성된 코팅 막의 조성, 표면 형태학, 기관과의 접착 강도 및 코팅 막으로서의 내 부식성 등 표면특성 및 물리화학적 특성을 조사하였다.

## 2. 실험

### 2-1. 시편제조

본 연구에 사용된 환원 분진은 조성이 C 50%, Fe 40%, SiO<sub>2</sub> 5%, MgO 3%, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 2%로서 (주)한타M&B에서 공급 받았으며, 다른 특별한 처리하지 않고 SIEVE (NO. 100과 NO. 200, 청계상공사)로 선별하여 입도 106-125 μm의 분말(G120), 90-106 μm (G106), 와 65-90 μm (G60)의 세 종류로 나누어 연구를 시행하였다. 이 때 G120, G106 및 G60의 Fe 함유량을 습식 분석한 결과 G60에서 Fe의 함량이 약간 높았으나 세 종류의 샘플 모두 큰 차이를 보이지는 않았다.

열용사 코팅은 10 cm×10 cm의 금속 기관을 전 처리 블라스팅 후 Fig. 1에 도시한 구성 설비를 이용하여 열용사 코팅을 수행하였으며 이 때 기관과 용사건과의 거리는 10 cm, 입자의 분사 속도는 50-60 m/s, 화염의 온도는 3,100 °C로 고정하여 연구를 수행하였다. 이 때 Fig. 1의 용사건은 5P-II(NETCO) 용사건으로써, 분말 저장 통이 건에 장착되어 있어 용사 각도가 ±50°를 초과하는 경우에는 분말 이송률이 고르지 않을 수 있기 때문에 용사 각도는 0°를 유지하였다. 그리고 코팅 막은 0.5±

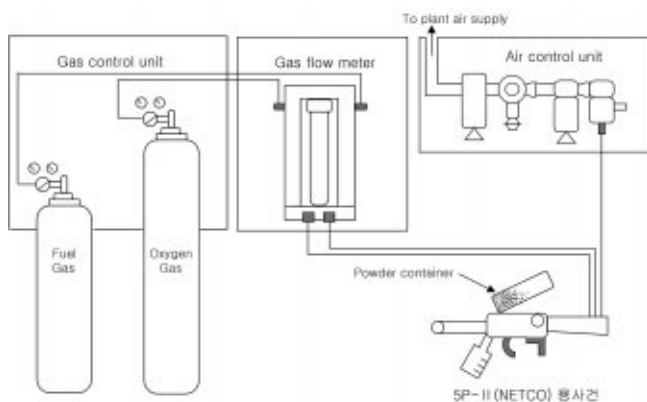


Fig. 1. Descriptive set up for a thermal spray coating.

0.025 mm를 유지하였다.

### 2-2. 표면층 조사 및 접착강도

코팅 막의 분석은 우선 표면과 단면의 형태학을 연마공정 없이 용사 건의 분말 형태를 SEM(JEOL 200CX with EDS)을 이용하여 분석하였으며, 코팅 막과 분말의 결정성은 XRD(D/MAX, RiKagu, Japan: CuKa radiation)을 이용하여 분석하였다. 또한 코팅 전후의 표면 조성을 XPS (KRATOS XSAM 800 type spectrometer)를 이용하여 조사하였다. 코팅 막의 기관에 대한 접착 강도는 Fig. 2에 도시한 방법으로 UTM(H10K-S)을 이용하여 매 시료 당 4회 반복 측정하였다.

### 2-4. 전기화학적 부식실험

열용사 코팅된 코팅 막의 부식특성을 알아보기 위하여 분극실험을 수행하였다. Sus에 열용사 된 시편을 5 cm×5 cm×0.5 cm 크기로 절단한 다음, 열용사 코팅된 부분을 에폭시 수지로 평활하게 피복한다. 에폭시 수지가 경화된 후에 중앙부분에 오토드릴을 이용하여 직경 4 mm 정도의 원을 만들어 에폭시 피복을 벗겨내고 열용사 코팅 층이 노출되도록 한다. 이를 중심으로 시편위에 등근 유리관 올려놓고 실리콘으로 고정하여 시험 전까지 테스케이터 내에 보관하였다. 부식실험의 계약 도를 Fig. 3에 나타내었다. 시편의 전기화학적 분석은 EG&G 274A Potentiostat/Galvostat를 이용하여 5 mV/sec의 주사속도로 분극실험을 행하였다.

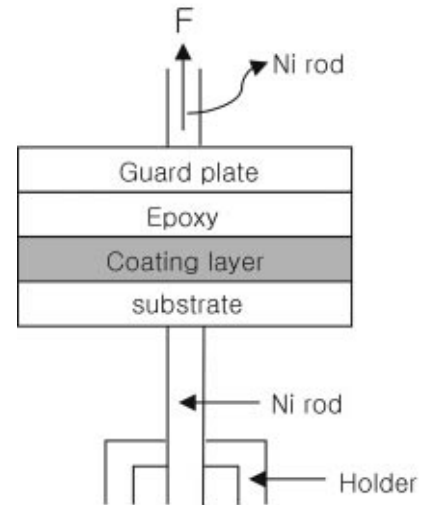


Fig. 2. Schematic illustration for the adhesion test.

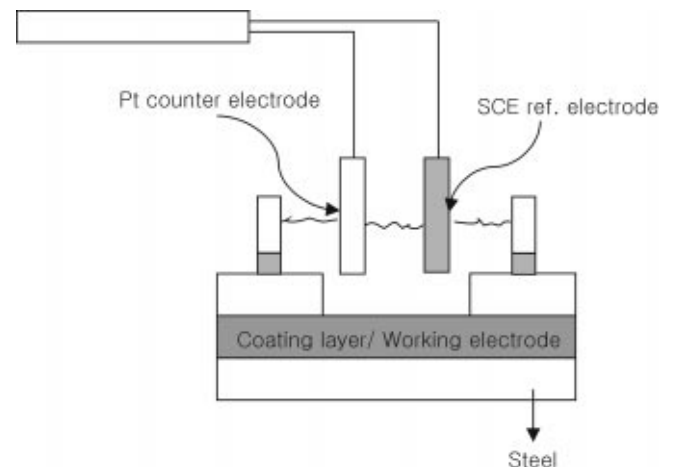


Fig. 3. Schematic illustration for the test electrochemical corrosion cell.

코팅 막의 전기화학적 부식도 측정실험을 위해 사용된 전해액은 상온에서 가혹한 부식 환경에 해당하는 0.1 N HCl 용액을 사용하였다. 이때 전위를 측정하기 위한 기준 전극(reference electrode)으로는 포화칼로멜 전극(saturated calomel electrode: SCE)을 사용하였으며, 상대전극(counter electrode)으로는 백금선(Pt wire)을 이용하여 환원수소가스 발생의 지지 금속으로 사용하였고, 시료전극(working)의 노출면적은 직경 4 mm의 단면 원으로 하였다. DC 부식 측정을 위해 352 softcorr III 부식 시스템 소프트웨어를 이용하였다.

### 3. 결과 및 고찰

G60, G106 및 G120 환원 분진들의 Fe 조성은 습식 분석[12]을 통하여 조사한 결과 10% 범위 내에서 일정함을 알 수 있었다. 따라서 본 연구에서는 G60 G106 및 G120에서의 Fe 함량이 동일한 것으로 가정하고 열용사 코팅을 수행하였다. 물론 열용사 코팅 막의 미세구조는 분말 입자의 분포 및 열용사 조건들에 민감하게 변화하나[13], 우선 각각 입자들의 증착 효율을 알기 위해 분말 유입속도(0.3 g/sec), 용사거리(10 cm) 및 기관의 크기(5 cm×5 cm)를 일정하게 한 후 증착막이 0.5 mm 두께로 성장하는데 걸리는 시간을 측정했으며, 그 결과를 환원 분진과 조성이 가장 유사한 현재 상용화하고 있는 350NS 용사 분말 재료와 비교하여 Fig. 4에 도시하였다. 증착효율은 G120이 상용하는 350NS와 유사하게 우수하였다. 그 이유로는 G60과 G106 재료들은 입자의 크기가 작아 화염 안에서 기화되어 증착효율이 감소한 것으로 사료된다. 용사 분말 재료는 단분산된 구형일수록 재료 유입이 용이하여 가장 이상적이거나, 현실적으론 이러한 단분산된 구형 재료의 생산이 거의 불가능하며, 일반적으로 Fig. 5에 도시한 환원 분진들과 같이 불규칙한 형태의 입자들도 많이 사용된다. 환원 분진들은 Fig. 5의 SEM 이미지와 같이 불규칙한 날카로운 모양의 탄소 입자와 분말 형태의 Fe 입자들로 동일한 것을 알 수 있다. 입자 모양들이 이상적인 구형은 아니나 용사건으로 유입하는데 별다른 어려움은 나타나지 않았다. 상기의 초기 결과에 기준하여 본 연구에서는 증착 효율이 좋았던 G120 재료를 중심으로 열용사 코팅을 수행하였다.

코팅후의 표면은 광택이 나며 어두운 흑권색을 띠었으며, Fig. 6(a)에 도시한 SEM 이미지에 의하면 열용사 코팅 후의 표면 형태는 Fig. 5에서 관찰한 불규칙한 날카로운 형태의 탄소와 분말 형태의 Fe 입자들이 사라지고 막형태와 구형 형태로 불규칙하게 기관에 증착된 것을 알 수 있다. 이들 표면을 보다 확대하여 보면 구형이나 막 형태의 구조들이 50-100  $\mu\text{m}$ 정도의 미세 구형입자들로 구성된 것을 확인할 수 있었다(Fig. 6(a)). 원래 입자들이 지녔던 형태(Fig. 4)들이 사라지고 구형과 불규칙한 막 형태를 보이는 것은 입자들이 화염 안에서 용융된 후 기관에 충돌하며 융착되어 나타난 구조인 것으로 사료된다. 또한 코팅된 막의 단층 구조를 SEM을 이용하여 조사한 결과 막단면 전역에 걸쳐 동일하

게 구형의 입자들이 융착되며, 증착된 형태를 보여주고 있다(Fig. 6(b)). SEM 이미지에서 코팅막이 많은 기공을 지니고 있음을 보여주나 이러한 현상은 열용사시 용사건과 기관과의 거리를 조절하며 화염의 온도 및 속도를 높이면 기공이 감소할 것으로 사료된다. 코팅 막의 새로운 형태확대로 보아 주성분인 Fe와 탄소가 서로 용해되어 증착되며 새로운 물질의 막으로 코팅된 것으로 사료된다.

코팅 막의 미세구조를 보다 자세히 관찰하기 위해 XRD를 이용하여 G120 재료와 용사 후 코팅 막의 x-ray 회절 분석 결과를 비교해 보면 결정격자들이 매우 다른 것을 알 수 있었으며, 특히 코팅 막에서는 마그네타이트 형태의 산화철이 코팅 막에서는 주로 생성된 것을 알 수 있었다(Fig. 7). 실제로 환원분진의 x-ray 회절 패턴은 주로 탄소와 Fe가 주성분임을 알 수 있으나, 열용사 후에는 Fe에 대한 x-ray 회절 패턴은 사라지고 마그네타이트의 강한 x-ray 회절 패턴과 탄소에 대한 약한 X-ray 회절 패턴만 나타남을 알 수 있다(Fig. 7). 이는 열용사 코팅 중 용융된 Fe가 공기 중의 산소 및 수분과 쉽게 산화하여 마그네타이트로 변형된 것으로 사료된다. 실제로 Fe가 주성분인 상용하는 열용사 분말재료인 350NS를 동일한 조건에서 열용사한 후 XRD를 이용하여 조사한

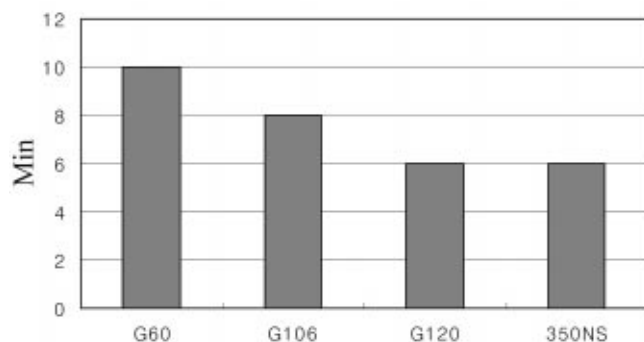


Fig. 4. Deposition efficiency for G60, G106, G120, and 350NS.

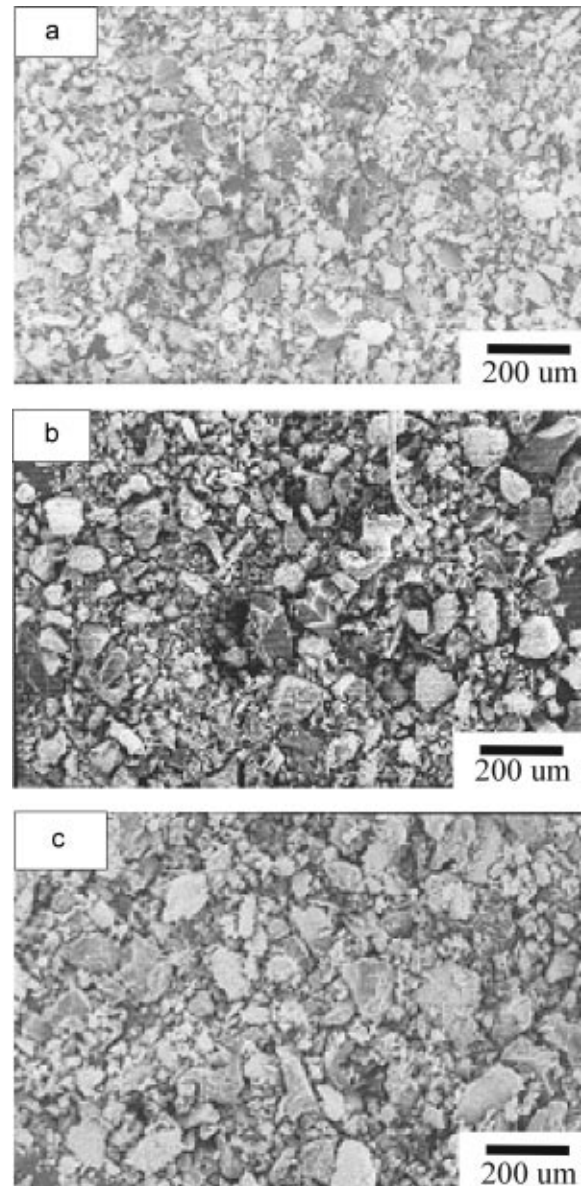


Fig. 5. SEM images for G60 (a), G106 (b), and G120 (c).

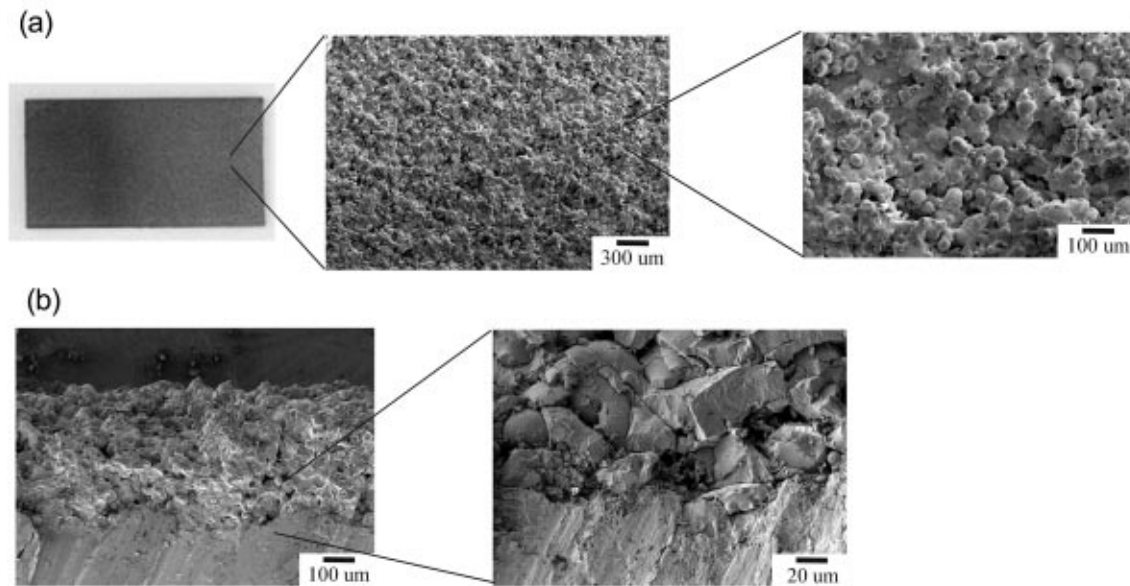


Fig. 6. SEM images for the surface (a) and the cross section (b) of the coated film.

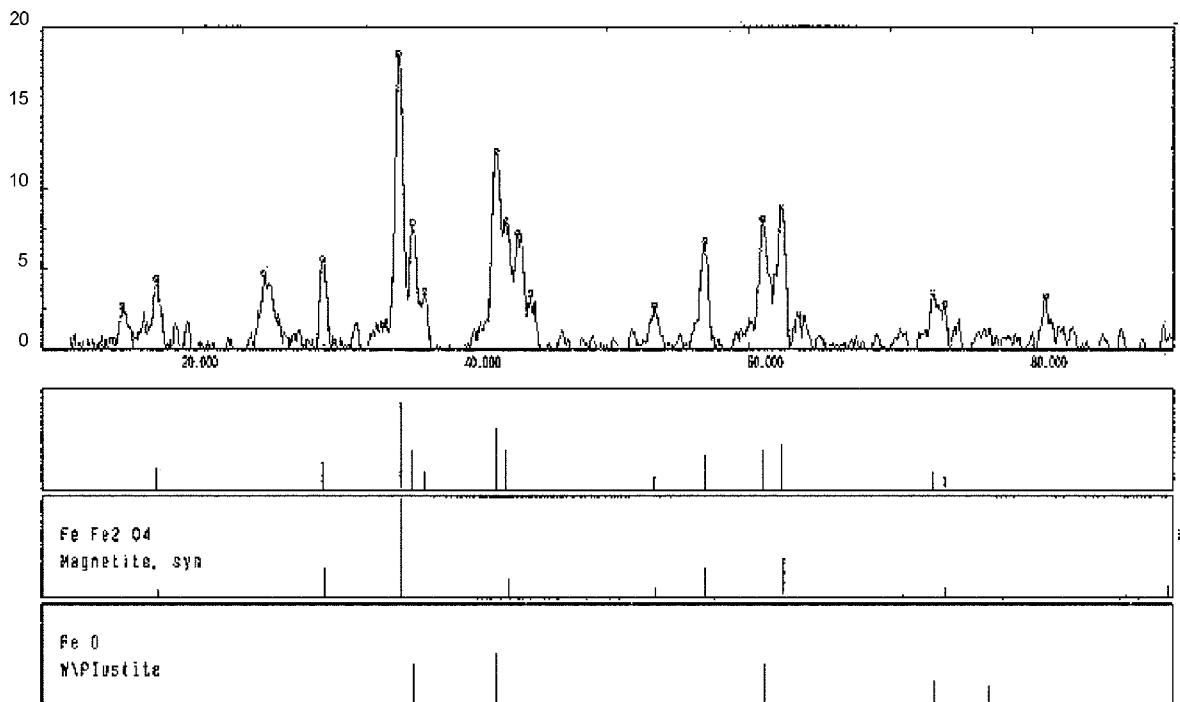


Fig. 7. XRD patterns for thermal spray coated films using G120 powder.

결과를 보면 G120을 이용한 코팅 막과 동일하게 마그네타이트가 주성 분임을 쉽게 알 수 있었다. 물론 용사조건을 변화시킨다면 마그네타이트 외에 다른 형태의 물질로 코팅이 가능하나[14], 이러한 연구는 본 논문의 범위를 넘으므로 이에 관한 부분은 다음 논문에서 다루고자한다. 열용사 후의 G120 코팅 막 조성을 XPS로 조사한 결과 Fe의 결합에너지 피크인 707 eV 영역에서는 피크가 보이지 않았으나, 마그네타이트 형태의 Fe 결합에너지 피크가 710.9 eV[15]에서 나타나는 것을 확인할 수 있었으며 이는 XRD 결과와 일치하는 결과를 할 수 있다(Fig. 8).

코팅 막의 기판에 대한 접착력은 열용사 응용측면에서 가장 중요한

물성이라 할 수 있다. 열용사에서의 접착력은 코팅막이 미세구조상 기판과 복합재료의 성격을 띠기 때문에 금속-금속 또는 세라믹-금속 결합경로에 따라 기계적 인터록, 금속-금속 또는 세라믹-금속 결합 및 화학적 결합의 세 종류로 크게 분류할 수 있다[16]. 열용사의 공정 또는 조건들을 변화함에 따라 코팅의 미세구조가 변화됨에 따라 이로 인한 접착강도 또한 위의 세 가지 분류 안에서 변화된다. 또한 접착강도의 측정 방법에 따라서도 측정값이 일정하지 않기 때문에 목적한 열용사 코팅 시스템에 적합한 장치를 꾸며 측정하여야 한다. 따라서 본 연구에서는 Fig. 2에 도시한 방법으로 UTM을 이용하여 4회 측정하여 그 결과를 Table 1

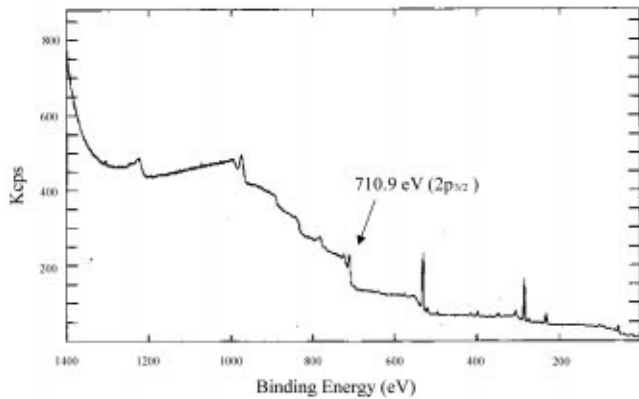


Fig. 8. XPS spectra for the thermal spray coated film using G120 powder.

Table 1. Rupture strength (MPa) in the adhesion test

	1	2	3	4
G120	0.1	0.08	0.07	0.08
350NS	0.09	0.12	0.11	0.13

에 도시하였다. 앞의 Fig. 6에 도시한 표면 및 단면 형태에서 알 수 있듯이 코팅 막에 많은 기공을 지니고 있어 접착강도가 높지 않을 것으로 예측했으나, 코팅막이 박리된 후 기판 표면에 코팅 층이 많이 남아있는 것으로 보아 기판 표면과 코팅 막 사이에 화학적 결합이 있었던 것으로 사료된다. G120을 이용한 용사코팅은 시판하고 있는 350NS에 비하여 접착강도가 대등하게 나타났다. 이와 같이 본 연구에서 사용한 열용사 조건의 경우 Fe가 주성분인 분말재료 사용시 금속 기판과는 화학적 결합을 제공할 수 있는 것으로 보인다.

코팅 막의 내 부식성은 코팅 막의 응용 분야를 결정하는 중요한 인자들 중 하나이다. 본 연구에서는 코팅 막의 내 부식성을 전기 화학적 방법으로 조사하고 그 결과를 Table 2와 Fig. 9에 도시하였다. Fig. 9는 각 시험재료에 대하여 동전위 분극 거동을 알아보기 위하여 0.1 N HCl 용액에서 주사속도 5 mV/sec를 주어 환원 분진(G106, G120), 흑연(5%) 혼합 분말(G120-G) 등으로부터 제조된 코팅 막의 분극 시험한 결과를 나타내었다. 또한 여기에 내식성을 부여하기 위하여 Fe/Mo/C 조성을 갖는 상업용 열용사 재료가 혼합된 환원 분말(G120-350NS)로부터 제조된 열용사 시편을 비교한 결과도 함께 나타내었다. 또한 부식에 의한 손상저항 정도를 분극저항( $R_p$ , polarization resistance) 값으로 일반적으로 표시하기 때문에 이들 각 시편에 대한 분극 저항 값을 Table 2에 나타내었다.

Fig. 9와 Table 2에서 알 수 있듯이 평형 전위 값이 가장 높은 상업용 열용사 재료가 혼합된 환원 분말(G120-350NS)이 가장 우수한 부식저항성을 나타내고 있다. 또한 흑연이 첨가된 분말도 부식 저항성은 우수하였으나 환원 분진의 경우 코팅 후 산화철 형태로서 부식 저항성이 좋지 않은 것으로 나타났다. 이는 앞서 설명한 코팅 막의 표면 분석 결과와도 일치하는 결과를 보여 주고 있다. 즉 G120-350NS는 열용사 시에 주성분인 Fe와 탄소가 서로 용해되어 증착됨으로써 새로운 형태의 막으로 표면이 다른 시편에 비해 치밀하게 코팅된 것으로 판단된다. 반면 환원분진만으로 코팅된 시료는 표면이 훨씬 불규칙적이며 많은 기공도 역시 관찰되고 있다. 그 차이의 정도는 입도가 작은 환원분진(G106)에서 크게 나타나 부식저항성이 가장 나쁜 것으로 판단된다. 이는 부식 저항성이 표면에 형성되는 코팅 막의 특성에 크게 의존하며, 합금원소의 첨가에 따라서 달라진다는 Kim 등[17]의 연구 결과와 잘 일치함을 보여주고 있다.

Table 2. The values of polarization resistance( $R_p$ )

	G120-350NS	G120-G	G120	G106
$R_p$ [kΩ]	1.180	1.102	1.758	3.807

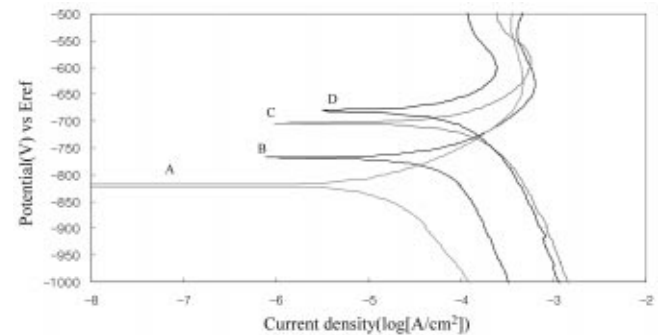


Fig. 9. A plot of potential-current density curves for G106 (A), G120 (B), G120-G (C), and G120-350NS (D).

## 4. 결 론

제철 폐기물인 분진을 이용하여 단순 공정을 통해 이들 분진들이 고부가가치의 열용사 코팅 재료로 이용될 수 있음을 보였다. Fe와 탄소가 전체 환원 분진 함량의 90%인 분진들을 입도별로 선별하여 열용사 코팅 분말재료로 이용시 입도 크기가 106-125  $\mu\text{m}$ (G120)인 분진들의 증착 효율이 제일 높았고, XRD와 XPS 분석을 통해 탄소와 마그네타이트의 복합물로 코팅되었음을 알 수 있었다. 이 때 코팅 막의 접착 강도는 약 0.1 MPa로서 상용하는 350NS를 이용한 코팅 막의 접착 강도와 유사 하였다. 또한 전기 화학적 부식 실험을 통해 G120과 G120에 흑연을 5% 첨가한 코팅 막의 내 부식성 또한 우수한 것으로 보였다. 따라서 G120-G를 위에서 제시한 비율로 혼합하여 열용사 코팅한다면 부식방지를 목적으로 하는 곳에 효과가 있을 것으로 판단된다.

## 감 사

본 연구는 중소기업청의 컨소시엄 제9차 사업과 (주)한타 엠엔비를 통해 지원되었습니다. 연구비 지원에 감사합니다.

## 참고문헌

1. Auth, R., Hoffken, E., Kaas, W., Maas, H. and Seidelmann, L., "Hot Briquetting of the Filter Dust from Basic Oxygen Steelmaking," *Stahl und Eisen*, **107**, 80(1987).
2. Hoffken, E., Pflipsen, H. D., Seidelmann, L. and Auth, R., "Development of the Thyssen Hot Briquetting Process and its Industrial Application," *Stahl und Eisen*, **108**, 705(1988).
3. Ban, B. C., "Preparation of Iron Powders for Abrasives from LD-Converter Dust," Research Report, KOSEF 91-0306-13(1993).
4. Rosano, H. L., Breindel, K., Schulman, J. H. and Eydt, A. J., "Mechanism of Ionic Exchange with Carrier Molecules through Nonaqueous Liquid Membranes," *J. Colloid Interface Sci.*, **22**, 58(1966).
5. Ban, B. C., "Preparation of Sponge Iron Powder for Abrasives by Gas Reduction," Research Report, SANHAK HYUPDONG JAEDAN (1991).
6. Thrope, M. L., "Thermal Spray: Industry in Transition," *Advanced Materials and Processes*, **143**, 50(1993).

7. Pawlowski, L., "The Science and Engineering of Thermal Spray Coatings," John Wiley & Sons, Singapore(1995).
8. Rayment, T. and Grant, P., "Optimisation of an Electric Arc Gun Cluster Design for the Sprayform Tooling Process," Proceedings of the 1st ASM International Surface Engineering Congress and the 13th International Federation for Heat Treatment and Surface Engineering Congress(2003).
9. Zhang, T., Tang, B. Y., Chen, Q. C., Zeng, Z. M., Chu, P. K., Bilek, M. M. M. and Brown, I. G., "Vacuum Arc Plasma Transport through a Magnetic Duct with a Biased Electrode at the Outer Wall," *Review of Scientific Instruments*, **70**, 3329(1999).
10. Jackson, M. R., Rairden, J. R., Smith, J. S. and Smith, R. W., "Production of Metallurgical Structures by Rapid Solidification Plasma Deposition," *J. Metals*, **33**, 23(1981).
11. Uozato, S., Nakata, K. and Ushio, M., Manufacturing Engineering Office, Isuzu Motors Ltd., Kanagawa, Fujisawa, "Corrosion and Wear Behaviors of Ferrous Powder thermal Spray Coatings on Aluminum Alloy," *Surface and Coatings Technology*, 169(2003).
12. Dissolved Fe Contents from Reduced Powder Slags Using Sulfuric Acid and Measured Dissolved Fe Amounts in the Solution using Atomic Absorption Spectroscopy.
13. Crawmer, D. E., Bartoe, R. L., Kramer, J., Columbus Div., Battelle, Columbus, "Improved Universal Powder Mass flow Control for thermal Spray Applications," *Surface and Coatings Technology*, **33**, 353(1987).
14. Moreau, C., Cielo, P. and Lamontagne, M., "Flattening and Solidification of Thermally Sprayed Particles," *J. Thermal Spray Tech.*, **1**, 317(1992).
15. Moulder, J. F., Stickle, W. F., Sobol, P. E. and Bomben, K. D., "Handbook of X-ray Photoelectron Spectroscopy," Chastain, J. and King, R. C., eds., Physical Electronics, Inc., Eden Prairie, MN(1995).
16. Chuanxian, D., Bingtan, H. and Huiling, L., "Plasma-Sprayed Wear-Resistant Ceramic and Cermet Coating Materials", *Thin Solid Films*, **118**, 485(1984).
17. Uozato, S., Nakata, K. and Ushio, M., "Corrosion and Wear Behaviors of Ferrous Powder Thermal Spray Coatings on Aluminum Alloy," *Surface and Coatings Technology*, 169(2003).