



공학석사학위논문

자용성 합금 용사코팅 기술을 적용한 롤 제조기술 연구



2022년 2월

부경대학교대학원

금속공학과

박 지 웅

공학석사학위논문

자용성 합금 용사코팅 기술을 적용한 롤 제조기술 연구



2022년 2월

Ч

I

OL

부경대학교대학원

금속공학과

박 지 웅

박지웅의 공학석사 학위논문을 인준함.

2022년 2월 25일



목 차

표 목차	iv
그림 목차	v
ABSTRACT	vi
I. 서 론 ······	01
Ⅱ. 이론적 배경	05
2.1. 용사의 역사 및 현황	05
2.2. 용사의 종류	06
2.3. 용사의 특징	08
2.3.1. 고온/고속가스의 유동	08
2.3.2. 용융 입자의 가속 및 가열속도	09
2.3.3. 용융 입자의 충돌 변형	10
2.3.4. 코팅층의 미세구조와 물성	15
2.4. 용사 재료	17
2.5. 용사 기술의 활용도와 제품적용	19

Ⅲ. 실험방법	20
3.1. 상용 분말	20
3.2. 분말 형상 입형 및 성분 분석	21
3.3. 합금 분말 경도 시편 제작	21
3.4. 합금 분말 경도 특성 파악	21
3.5. Powder flame spray 공정을 이용한 용사 시편 제작	22
3.5.1. 용사 작업 조건 선정	22
3.5.2. 용사 시편 제작	22
3.5.3. 용사 표면층 경도 측정	22
3.5.4. 최적화 조건 선정	23
3.6. 용사 시편 접합강도 측정	25
3.7. 충돌해석 시험	26
Ⅳ. 실험 결과	27
4.1. 분말 합금 특성	27
4.1.1. SEM 결과	27
4.1.2. EDX 결과 ······	39
4.2. 합금 분말 경도 시험	35
4.3. 용사 작업조건 선정	37
4.4. 용사 시편 경도 측정	42
4.5. 용사 작업조건에 대한 경도 측정	43
4.6. 용사 층 접합강도 측정	44
4.7. 용사 건 거리에 따른 충돌해석시험	46

Ⅴ. 결론	49
참고문헌	 51
감사의 글	 55



표 목 차

[Table.3.1]	상용합금 분말의 시료	20
[Table.3.2]	최적의 작업조건 도출을 위한 작업 조건변수	23
[Table.3.3]	충돌해석 시험 조건	27
[Table.4.1]	각 분말 시편에 대한 경도 측정	37
[Table.4.2]	합금 분말에 대한 입도 분석	37
[Table.4.3]	각 용사 시편에 대한 경도 측정	44
[Table.4.4]	용사 작업조건에 따른 경도 값	46
[Table.4.5]	압입 하중 5kg에서의 접합강도 측정 및 균열 여부 확인	48
[Table.4.6]	용사 건 거리에 따른 잔류응력(Ni)	51
[Table.4.7]	용사 건 거리에 따른 잔류응력(WC)	52
	AYNA AN A	

그림 목차

[Fig.2.1] temperature and velocity distribution of plasma	10
[Fig.2.2] velocity distribution along jet center line at different molten	
particle sizes	13
[Fig.2.3] Temperature distribution along jet center line at different	
molten particle sizes by plasma spraying	13
[Fig.4.1] 상용 합금 분말의 SEM 이미지	29
[Fig.4.2] METCO 16C EDX 분석	31
[Fig.4.3] METCO 31C EDX 분석	32
[Fig.4.4] 1360-20 EDX 분석	33
[Fig.4.5] 1355-20 EDX 분석	34
[Fig.4.6] 1355-20-35% EDX 분석 ·····	35
[Fig.4.7] 합금 분말 시편 제작 시 그라인딩 전후 합금 분말의 모식도	37
[Fig.4.8] 용사 거리 200mm에서의 산소, 아세틸렌 양에 따른 용사 특징	40
[Fig.4.9] 용사 거리 250mm에서의 산소, 아세틸렌 양에 따른 용사 특징	41
[Fig.4.10] 용사 거리 300mm에서의 산소, 아세틸렌 양에 따른 용사 특징 …	42
[Fig.4.11] 조도값 Ra 4.4~4.8에서 5kg 하중으로 접합강도 측정	48
[Fig.4.12] 조도값 Ra 5.0~5.5에서 5kg 하중으로 접합강도 측정	49
[Fig.4.13] Ni base 합금 분말의 용사 건 거리에 따른 모재의 잔류응력 경향.	
왼쪽부터 용사 건 거리 200mm, 250mm, 300mm	51
[Fig.4.14] Ni base + WC 합금 분말의 용사 건 거리에 따른 모재의 잔류응력	

경향. 왼쪽부터 용사 건 거리 200mm, 250mm, 300mm ……… 52

A study on the roll manufacturing technology applying powder flame spray coating technology

Ji Woong Park

Department of Metallurgical Engineering, The Graduate School, Pukyong National University

Abstract

NAT

The purpose of this research is improve the mechanical properties and develop manufacturing technology through self-soluble alloy powder flame spray coating on the surface of the run-out table roller for hot rolling. The roller surface of the run-out table should maintain high hardness at high temperature and improve wear, corrosion, heat, adhesion resistance. In addition, the adhesive strength that does not peel off the coating layer by increasing the bonding strength between the thermal spray coating layer and the base material is also an important factor. In this study, it was possible to find the most suitable powder and process for roll manufacturing technology through initial selection of commercial alloy powder for roll manufacturing, hardness, component analysis, and adhesive strength analysis of the powder and thermal spray coating layer according to the powder.

I. 서론

철강 산업은 기계 건설, 자동차, 조선산업을 비롯한 대부분 산업에 기 초적인 소재를 공급하는 산업으로써 철광석과 scrap 등을 용해하여 빌 렛, 봉형강, 철근 등을 만들어내는 산업이다. 철강 압연 롤 및 철강 판재 운반용 롤은 철강재를 생산하기 위한 필수용품이며 내마모성 및 내열성 등이 필요하여 현재 일부 국산화가 진행되고 있으나 대표적인 핫 코일 을 이송하는 컨베이어 롤인 run-out table roller, unit roller 등 대부분의 철강 판재 이송 및 운반용 롤은 거의 수입에 의존하고 있다.¹⁻⁵⁾ 이러한 이송 및 운반용 롤의 경우 대부분 원재료 가격이 높을 뿐만 아니라 하 나의 라인에 다수의 롤이 적용되어 작동하므로 문제 발생 시 라인가동 중단에 따른 조업 차질이 발생하게 된다.

세계 여러 나라에서는 기존의 원심주조와 CPC(Counter Pressure Casting)공법으로 롤을 생산하고 있고 최근 국내/외 철강기업에서는 용 사 기술을 통해 내구성과 내마모성⁶⁻⁸⁾을 높여 생산성을 극대화시켜 활용 하고 있다. 게다가 용사 기술은 모재의 재질과 상관없이 금속의 경우 모 두 적용할 수 있기 때문에 롤뿐만 아니라 모든 제품군에서 적용할 수 있다. 용사 기술의 경우 해외 다수 기업에서 기술을 보유하고 있지만 국 내업체가 수입재를 사용한다면 적기에 수급이 어렵고 생산에 큰 문제가 발생할 수 있다. 이에 따라 국내 다수의 기업에서도 용사 기술을 적극적 으로 개발중에 있으며 현재는 독일 및 일본과 기술 및 품질적인 차이를 조금씩 줄여나가고 있다. 국내 용사 기술이 점차 활용된다면 적재적소의 시기에 제품 납품하여 경쟁력 확보 및 생산성 향상을 기대할 수 있기

하지만 내식성, 내마모성이 우수한 Ni, Co계의 자용성 합금은 제철소의

- 1 -

열간 압연으로 사용되는 런-아웃 table-roller의 피복 소재로 사용되었지 만 열연 강판의 표면 마찰계수가 낮아 제한적으로 사용된다. 또한 롤은 환경적으로 고온 열연강판과의 연속적인 접촉으로 인해 마모가 발생하 고 이송되는 중 냉각을 목적으로 분사되는 냉각수로 인해 고온 강판은 부식될 우려가 있다. 이때, 부식에 의한 열연 스케일이 롤러 표면에 소 착되어 열연 강판 품질을 저하시키는 주 원인으로 작용한다. 이러한 결 함으로 인해 롤러 교체 주기가 짧아지면 생산성이 떨어지고 비용 절감 이 어렵다.¹¹⁻¹⁶⁾

이러한 문제점을 해결하기 위해 롤러 수명을 연장하고 우수한 내식성, 내열성을 부여할 수 있는 기계적 합금화법¹⁷⁾ 중 하나가 자용성 합금용사 (powder flame spray)이다. 합금분말을 고온의 열원을 통해 모재 표면에 protective coating이나 bulk shape를 제조하는 용사 방법은 두꺼운 코팅 층을 빠른시간 내에 표면처리 할 수 있고 내부식성과 내마모성을 위한 공법에 사용된다.¹⁸⁾

용사법이 개발된 초기에는 용사 코팅층은 다공질로 되어 있고 모재와의 접착력이 다소 부족하다고 인식하고 있었다. 그러나 다른 표면처리 법으 로는 불가능한 각종 비금속 재료나 고용점, 난가공성 금속재료의 쉽게 형성되는 코팅층 때문에 용사법, 용사 설비의 개발, 개량이 활발하게 이 루어져 왔다. 특히 1950년대말쯤 Union Carbide사의 폭발용사 (Detonation Gun)가 개발되어 본격적으로 고속용사 기술지 개발되었다 ²⁰⁻²¹⁾. 현대까지의 용사 기술 개발은 용사 환경 온도 상승에 의해서 높은 온도의 융점재료를 사용할 수 있고 합금 분말 입자의 산화 방지, 점진적 인 기술 개발로 합금분말입자를 고속화하면서 충돌에너지를 높여 접착 강도를 증가시켰다.²²⁾

하지만 M. Boas등은 용사 코팅층 내부의 산화물과 void들이 코팅층의

- 2 -

표면 균열을 야기하는 인자로 작용한다고 하였다. 마모 중 발생되는 표 면 균열들은 하중이 지속적으로 반복하게 되면서 성장하고 근접한 균열 들과 연결되어서 코팅층이 벗겨질 수 있기 때문에 주의가 필요하다.¹⁹⁾ 용사 공법의 종류가 여러 가지 있지만 그 중 자용성 합금 용사(powder flame spray)는 1차 용사 후 2차 재용융(fusing)하는 공정을 특징으로 하고 있으며 용사층은 모재와 완전히 용착되어 합금속을 형성하게 된다. 모재에 따라 로크웰 경도가 30~75까지 있으며 다른 금속에 비해 마찰계 수가 낮고 우수한 내마모성을 가진다. 또한 내식성과 내열성을 가진 금 속재료인 Ni, Fe, Cr 등을 주성분으로 구성되어 있기 때문에 우수한 내 식성과 내열성을 가진다.

용사재는 금속뿐만 아니라 세라믹, 플라스틱 등 여러 복합물 등이 있으 며 모재를 덧씌우기 위해 모재와 동일한 재료로 코팅하기도 한다. 용사 재의 형상은 와이어(wire)와 분말(powder)이 있으며 각각의 용사재에 적 합한 용사 장비를 사용한다.³¹⁾

용사 기술을 적용한 를 개발 시 가장 중요한 부분은 모재로 사용되는 강재의 기본 물성과 사용조건을 고려한 를 표면 용사 코팅 적용성 및 접합에 따른 사용 안정성 등이 해결해야 할 부분이며 이를 위해 공정 기술 개발이 필요하다. 또한 공정 중 다양한 변수가 있기 때문에 공정 변수에 따른 제품 품질의 편차가 발생할 수 있으며 안정적이고 우수한 표면 품질을 확보하기 위해 공정 변수에 따른 제품의 미세조직 변화 및 표면 코팅 특성 등을 우선적으로 파악해야 한다. 더 나아가 공정 Parameter를 통해 미세조직을 변화시키게 되면 미세조직에 따른 용사 층 피막 특성 최적화를 통해 최적화된 미세조직을 가지는 공정제어 기 술을 개발하여 소재 특성을 극대화 할 수 있는 연구가 먼저 이루어져야 하고 이를 통해 지속적인 연구와 적용 가능성, 품질 수명 향상을 이어가

- 3 -

야 한다.

따라서 본 연구를 통해 상용합금인 Ni, WC 금속 분말을 이용하여 자용 성 합금 용사 기술에 적용하기 위해 1차적으로 EDX, SEM을 통해 상용 합금 분말 특성을 파악하여 선정한다. 이후 상기 분말을 사용하여 용사 작업 조건을 선정하고 용사를 실시하여 제작된 시편으로 경도 측정, 모 재의 거칠기에 따른 용사층 접합 정도 확인, 작업조건에 따른 경도측정 및 충돌해석 시험을 진행하였다.



II. 이론적 배경

2.1. 용사의 역사 및 현황

용사법은 1910년대 스위스의 M. U. Schoop가 용탕식 용사법을 시작으 로 화염을 이용한 가스식 용사(gas flame thermal spray), 아크 열원을 이용한 전기식 용사(arc thermal spray)가 실제 사용되고 있다. 초기의 용사에는 Zn 등과 같이 주로 내식성이 양호한 연금속 피막이 사용되었 으나 시간의 경과와 함께 경금속 피막이 주류를 이루게 되었다. 1950년 대는 플라즈마 제트가 개발됨에 따라 그 용사 온도가 10,000K의 플라즈 마 용사법(Plasma Thermal Spray)으로 발전되었다. 또한 우주항공산업 의 발달로 새로운 내화재료가 폭넓게 이용되기 시작하였고 폭발 용사 (detonation thermal sprav)같은 새로운 기술이 개발되었다. 1960년대 용 사의 물리적인 해석 연구가 시작되었고 이후 1973년에는 진공 플라즈마 (vacuum plasma spraying, VPS)가 폭넓게 응용되기 시작하였다. 1980 년 개발된 고속 화염용사(high velocity oxy-fuel spraying, HVOF)가 개 발되어 현재 널리 사용되고 있다.23-25) 유럽의 용사 시장은 전 세계 용사 시장의 약 30%로 추정되고 용사 재료, 용사 장비를 생산하는 업체와 용 사를 시공하는 업체 등에 의해 주도되고 있다. 유럽에서의 용사 재료와 장비는 용사 시장의 약 23%를 점유하고 있으며 용사 코팅 시작은 77% 를 차지하고 있다. 용사 코팅의 적용 분야는 내마모성과 내식성에 대한 기계적인 보수와 코팅을 포함한 저부가가치산업과 항공 산업, 가스터빈, 프린터롤, 생체재료 부분과 같은 고부가가치산업으로 대별된다. 용사 코 팅의 경우 재래기술의 개발 노력은 감소하는 반면 항공기 및 자동차산 업에 활용되는 high-tech에 대한 기술 개발이 중요성을 알 수 있다.²⁶⁾

2.2. 용사의 종류

먼저 용사 시스템은 일반적으로 spray gun, 가스 공급장치, 냉각장치, 가스 유량 조절장치 및 분말 공급장치로 구성되어 있다. 가스가 spray gun 내부 연소실에 공급된 후 점화에 의해 폭발이 일어나게 되고 고온 및 고속의 가스가 노즐 내부에서부터 팽창하게 된다. 이후 용사재료가 혼입되면서 팽창된 가스에 의해 노즐로부터 분사되며 모재에 피막이 형 성된다. 용사재료 공급은 spray gun 내부 또는 외부에서 투입되며 냉각 수는 고온의 화염에 의해 가열된 노즐 주위로 순환하면서 냉각하게 된 다.

용사 법은 용사 재료와 열원의 종류에 따라 전기식과 가스식으로 분류 된다. 전기식 용사는 전기 에너지를 이용하는 방식으로써 대표적으로 아 크 용사법이 있다. 아크 용사는 2개의 금속 wire에 전기를 흘려 아크 방 전을 발생시켜 wire를 용용 속도에 맞추어 wire를 송급하고 용융된 금 속을 압축 공기에 의해 미립화 시켜 모재에 연속적으로 성형하는 용사 법이다.

가스식 용사는 산소와 가연성가스의 연소에서 발생하는 고압, 고온의 가 스를 대기에서 고속으로 분출시켜 체적팽창에 의해 발생한 에너지를 이 용하는 방식이다. 대표적으로 자용성 합금 용사(powder flame spray)가 있다. 이 용사법은 산소-아세틸렌 또는 산소-프로판 등의 가스의 연속 불꽃(flame)속에 wire 또는 powder 상태의 용사 재료를 연속적으로 송 급하여 용융시켜 압축 공기로 용융된 재료를 분사하여 피막을 형성하는 용사법이다.

Cold spray는 최근에 개발되었으며 용사 재료 융점보다 낮은 온도의 가 스를 분사하도록 설계된 방식이다. 낮은 온도로 가열된 가스 내에 용사 재료를 투입하면 액체 상태가 아닌 고체 상태로 고속으로 분사되며 모 재에 충돌하여 소성 변형된 피막을 형성하게 된다. 용사 재료는 주로 cermet, 금속(Ni, Cu, Ti)이 사용되며 열 변형 및 산화가 없고 높은 밀착 력을 갖는 코팅층을 얻을 수 있는 장점을 가지고 있다.⁴⁷⁾



2.3. 용사 특징

용사 코팅에 있어 코팅층의 합금 분말 입자 두께 및 냉각 속도, 합금 분 말 및 코팅층의 산화된 정도 그리고 모재의 온도, 분말의 초기 조직 등 이 주요 인자로 작용하는 실험 결과가 보고되고 있다.²⁷⁻²⁸⁾

게다가 높은 밀착성의 코팅을 요구하는 경우 전처리의 영향이 매우 크 다. 분사된 합금 분말 입자가 모재의 표면에 침투하고 모재의 표면을 거 칠게 만들어 접촉 면적을 넓혀야 한다. 또한 모재 표면에 부착된 산화물 은 아르곤, 아세톤, 가성 소다 등의 물질들을 모재 표면에 용제침투, 분 무 및 증기 등으로 제거하면 모재와의 밀착력을 높일 수 있다.²⁹⁾ 전기식 용사 법의 특징으로는 용융온도가 매우 높아 용사 대상 재료의 선택 폭이 넓고 밀착 강도, 피막 강도가 높다.

가스식 용사 법은 장치의 경량으로 현장 시공에 적합하고 열에 의한 모 재 변형이 적다. 또한 용사 두께 조절이 가능하고 모재의 선택폭이 넓 다.

CH OL M

2.3.1. 고온/고속가스의 유동

연소 및 방전에 의해 발생되는 가스의 속도와 온도는 상호 관계를 가지 므로 온도만 알고 있으면 대기 중에 분사된 입자의 평균속도는 기체 방 정식으로부터 단위 시간당에 공급된 가스의 체적을 계산하여 용사 노즐 의 단면적을 빼면 노즐 출구로부터 분사된 가스의 속도를 알 수 있다.

[Fig.2.1]에 플라즈마 제트의 온도 및 속도 분포를 나타내었다. 반경 반 향의 온도분포는 높은 온도 구배를 가지고 있으며 축 방향의 온도 및 속도는 주변 공기가 많이 혼입되기 때문에 급격하게 감속하는 것으로 보인다. 일반적으로 이러한 경향은 조건에 관계없이 원형 노즐 모양의 분사 특성에 의존하기 때문이다.⁴²⁾

2.3.2. 용융 입자의 가속 및 가열속도

양호한 코팅을 위해 기본적으로 합금 분말 입자의 용융온도가 일정하게 유지되고 치밀한 코팅층이 생성되도록 입자가 충분히 가속되어 모재와 충돌되어야 한다. 분말용사의 가속, 가열은 동일한 시점에 시작되며 입 자의 가속은 가스의 체적팽창과 비례하지만 가속에 따른 화염내의 잔류 시간이 짧아서 용융되지 않은 상태로 모재와 충돌하며 비행궤적이 가스 유동에 따라가는 경향이 생긴다. 용융입자의 속도변화는 다음과 같은 방 정식으로 예측이 가능하다. 여기서 U는 속도, p는 밀도, 첨자 p, q는 입 자 가스, C_D는 항력계수이다. 수치계산에서 점성에 기인하는 항력계수는 Re수에 달라짐을 고려해야 한다.

d U_p/dt =
$$\frac{3}{4} \frac{\rho_q C_D}{\rho_p D} (Uq - Up)$$
 (4.2.1)⁴²

[Fig.2.2.]는 입자 경에 따른 노즐 축 중심의 속도 변화를 나타낸 것으로 ⁴³⁾ 3um 입자는 노즐 내에서 가스와의 혼합이 충분히 이루어져 분출하기 때문에 급격한 속도 감속이 일어난다. 하지만, 입경이 클수록 노즐 선단 에서부터 속도가 점차적으로 증가하고 있다. 이러한 이유는 입경이 작은 경우와는 반대로 노즐 선단에서부터 계속적으로 가스의 운동량이 입자

- 9 -

에 전달되어 입자의 운동량이 커지기 때문에 입자의 속도 성분이 증가 하고 있다. 입자의 가열온도는 입자 내부의 열전도율이 충분히 크다고 가정하여 입자 내부의 온도분포를 무시하면 다음과 같은 방정식을 구할 수 있다. 온도는 T, C_p는 용사 입자의 비열, λ_p는 가스의 열전도율, r은 입자의 반경이다.

$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{\rho p \ C p \ r^2} \frac{d}{dt} (r^2 \ \lambda_p \ \frac{dT}{dr}) \qquad (4.2.2.)^{42}$

[Fig.2.3.]은 플라즈마 용사를 이용한 alumina 입자의 노즐 축 중심에서 의 표면온도 분포를 측정치와 계산치를 비교한 것이다.⁴⁴⁾ 입경이 작을수 록 가열과 냉각이 쉽게 일어나며 입경이 클수록 가열시간이 길어진다. 특히 열전도율이 나쁜 세라믹 입자는 표면이 용융 되어도 입자의 중심 부는 고체 상태로 모재와 충돌하므로 입경 및 분포를 고려하여야 한다.

2.3.3 용융 입자의 충돌 변형

용사 입자는 충돌 전에 용융상태가 되면 액적은 충돌과 함께 변형하여 응고한다. 입자가 모재 표면에 충돌하여 변형하는 시간은 입자의 직경에 속도를 나눈 값으로 구할 수 있다. 즉 50µm의 입자가 200m/s로 속도를 가졌다면 변형에 필요로 하는 시간은 0.25µs가 된다. 변형현상은 응고현 상과 비교하여 매우 고속이므로 변형 및 응고 과정은 독립적으로 취급 하는 것이 가능하다.⁴⁵⁾ 용융 입자는 충돌 직전 운동에너지가 충돌 후에 입자의 내부유동을 일으켜 점성상태 에너지가 존재한다고 가정하고 충 돌 후의 입자 직경을 구할 수 있다. 이때 충돌 표면의 에너지 증가 및

- 10 -

응고는 무시하고 충돌 전의 입자 반경을 r_o , 충돌 후의 편평화한 원반의 직경을 R_o , 입자속도를 U_p 로 하면 근사식은 다음과 같다. 하기의 방정식에 서 충돌속도는 직경에 큰 영향을 미치지 못한 것을 확인할 수 있다.⁴⁶⁾

$$\frac{R_o}{r_o} = 1.48 \left(\frac{\rho_p U_p r_o}{u_p}\right)^2 \qquad (4.2.3.)^{420}$$

2.3.4 코팅층의 미세구조(Microstructure)와 물성

이상적인 조건에서 용융된 합금 분말 입자는 모재 표면 위에 평평하게 입혀진 후 급격하게 응고된다. 평평도의 정도는 용융된 정도, 용융된 금 속의 점성, 표면 젖음에 달려 있으며, 융융된 합금 입자 위에 다음 용융 된 입자가 동일한 방식으로 적층 되므로 코팅층은 층상구조를 갖게 된 다. 일반적으로 코팅층은 용융되지 않은 입자 위에 융착이 일어남으로 생긴 기공, 가스의 생성으로 인한 공극, 용융되지 않은 입자, 산화물 등 을 가지고 있다. 코팅층은 미세한 결정구조를 가지며 이 때 응고가 모재 방향 또는 반대 방향으로 진행되므로 층상 용착금속 안에 주상정 구조 를 나타낸다.³⁰⁾

코팅층의 결합력(bond strength)

코팅층의 모재에 대한 결합 메커니즘은 주로 코팅층과 모재 표면의 요 철부 사이의 맞물려진 기계적 결합이고, 약간의 국부적 확산과 합금화에 의한 야금학적 결합과 화학적 결합이 있다.³⁰⁻³³⁾ 코팅층의 결합력 측정 방법은 사용 환경에 따라 각각 다른 여러 가지 방법이 있을 수 있으나 주로 Pull-off test, indentation and scratch test, shear test, double-tortion test, four point bend test 등이 쓰이고 있다.³⁴⁾

잔류 응력(Residual stress)

두꺼운 코팅층에서는 잔류응력이 결합에 큰 영향을 미친다. 이 잔류응력 은 급속 응고할 때 코팅층과 모재층 사이에 열팽창이 발생하며 이 열팽 창 차이에 의해 일반적으로는 인장응력이 발생한다고 알려져 있으며 이 인장응력이 결합하는 힘보다 크면 균열이 발생하면서 코팅층이 떨어져 나간다. 그러나 입자속도가 매우 큰 경우에는 압축 응력이 코팅층에 생 길 수 있으며 이것은 피로(fatigue)에 이로운 영향을 미친다. 잔류응력 측정은 four point bend test를 하여 영률(young's modulus)과 엑스선 탄성계수(X-rays elastic constants)를 결정함으로써 알 수 있다.³⁵⁾

경도(hardness)

경도는 코팅 특성 중 가장 많이 인용되는 특성으로 코팅 밀도와 코팅층 간 혹은 용착 금속간 결합력이 클수록 크게 나타난다. 그러나 일반적으 로 인용되고 있는 경도의 마모 특성과의 비례관계는 잘못된 것으로 내 마모성이 크기 위해서는 경도도 높아야 하지만 인성도 좋아야 한다.³⁶⁾ 경도 측정으로는 일반적으로 Shore, Vickers hardness 측정 방법이 사용 되고 있다.



[Fig.2.1] Temperature and velocity distribution of plasma



[Fig.2.2.] Velocity distribution along jet center line at different molten particle sizes



[Fig.2.3.] Temperature distribution along jet center line at different molten particle sizes by plasma spraying

2.3.4 코팅층의 미세구조(Microstructure)와 물성

이상적인 조건에서 용융된 합금 분말 입자는 모재 표면 위에 평평하게 입혀진 후 급격하게 응고된다. 평평도의 정도는 용융된 정도, 용융된 금 속의 점성, 표면 젖음에 달려 있으며, 융융된 합금 입자 위에 다음 용융 된 입자가 동일한 방식으로 적층 되므로 코팅층은 층상구조를 갖게 된 다. 일반적으로 코팅층은 용융되지 않은 입자 위에 융착이 일어남으로 생긴 기공, 가스의 생성으로 인한 공극, 용융되지 않은 입자, 산화물 등 을 가지고 있다. 코팅층은 미세한 결정구조를 가지며 이 때 응고가 모재 방향 또는 반대 방향으로 진행되므로 층상 용착금속 안에 주상정 구조 를 나타낸다.³⁰⁾

코팅층의 결합력(bond strength)

코팅층의 모재에 대한 결합 메커니즘은 주로 코팅층과 모재 표면의 요 철부 사이의 맞물려진 기계적 결합이고, 약간의 국부적 확산과 합금화에 의한 야금학적 결합과 화학적 결합이 있다.³⁰⁻³³⁾ 코팅층의 결합력 측정 방법은 사용 환경에 따라 각각 다른 여러 가지 방법이 있을 수 있으나 주로 Pull-off test, indentation and scratch test, shear test, double-tortion test, four point bend test 등이 쓰이고 있다.³⁴⁾

잔류 응력(Residual stress)

두꺼운 코팅층에서는 잔류응력이 결합에 큰 영향을 미친다. 이 잔류응력 은 급속 응고할 때 코팅층과 모재층 사이에 열팽창이 발생하며 이 열팽 창 차이에 의해 일반적으로는 인장응력이 발생한다고 알려져 있으며 이 인장응력이 결합하는 힘보다 크면 균열이 발생하면서 코팅층이 떨어져 나간다. 그러나 입자속도가 매우 큰 경우에는 압축 응력이 코팅층에 생 길 수 있으며 이것은 피로(fatigue)에 이로운 영향을 미친다. 잔류응력 측정은 four point bend test를 하여 영률(young's modulus)과 엑스선 탄성계수(X-rays elastic constants)를 결정함으로써 알 수 있다.³⁵⁾

경도(hardness)

경도는 코팅 특성 중 가장 많이 인용되는 특성으로 코팅 밀도와 코팅층 간 혹은 용착 금속간 결합력이 클수록 크게 나타난다. 그러나 일반적으 로 인용되고 있는 경도의 마모 특성과의 비례관계는 잘못된 것으로 내 마모성이 크기 위해서는 경도도 높아야 하지만 인성도 좋아야 한다.³⁶⁾ 경도 측정으로는 일반적으로 Shore, Vickers hardness 측정 방법이 사용 되고 있다.



2.4. 용사 재료

용사 재료는 용사 방법의 개발에 따라 다양한 재료가 개발되었으며 최 근에는 복합 용사 재료 개발에 많은 연구가 진행되고 있다. 용사 재료로 써 순금속과 합금 금속, 산화물과 탄화물, 질화물 등의 세라믹계, 금속간 화합물계 플라스틱계로 나누어지며 재료의 형태는 용사 법에 따라 와이 어, 분말, 액체로 구분되어 있다. 분말의 경우 용융 시간을 고려하여 입 경을 일반적으로 수um ~100um정도로 하고 있다.

금속계 재료³⁸⁾

열전도률이 뛰어나고 재료 중심부의 용해 되는 시간이 매우 빠른 특징 을 가지고 있으며 금속 및 세라믹 표면을 강화하기 위한 결합 층 코팅 과 모재의 내식성, 내마모성, 내열성 및 내고온 산화성 등의 향상을 위 한 기술적인 기능성 코팅에 사용된다. 강재의 부식방지를 위해 알루미 늄, 아연 및 알루미나-아연 합금이 주로 사용된다. 알루미늄과 등은 전 도성 코팅재료로 사용되며 Ni-Cr합금은 내식성에 우수하여 고온에서 내 산화성인 고강도 재료로 사용되고 MCrAl합금은 내식성 및 내고온 산화 성에 사용된다. No-Al합금은 용융시 다량의 열을 방출하여 모재표면을 가열하기 때문에 밀착성이 양호한 코팅을 얻을 수 있으며 Mo, W 등의 고융점 금속은 고온재료 및 내마모 재료로 사용된다.

세라믹계 재료³⁹⁾

열전도율이 금속에 비해 낮고, 일반적으로 온도 및 약품에 대해 매우 안 정적이고 경도가 높기 때문에 고온 및 내마모성을 요구하는 표면처리에 사용된다. 산화물 재료로써 자주 사용되는 Al₂O₃는 열전도율이 가장 높 은 특성을 가지고 있으며 금속재료에 비해 양호한 밀착성을 가지기 때 문에 내마모성이 우수하지만 충격에는 약하다. 하지만 TiO₂를 첨가하면 코팅의 기공률이 감소하고 치밀한 코팅을 얻을 수 있다. ZrO₂는 열전도 률이 작고 열팽창률 계수가 금속에 가깝지만 온도에 의해 결정계 변화 와 밀도변화가 동시에 일어나 코팅 표면에 균열을 일으킨다. 텅스텐, 티 타늄 및 크롬 등의 탄화물의 고경도의 특성을 가지고 있으며 처음 산소 와의 반응에 비교적 낮은 온도를 가진다.

Cermet계 재료⁴⁰⁻⁴¹⁾

탄화물(TiC, ZrC, B₄C, WC), 산화물(Al₂O₃, ZrO₂, ThO₂)등의 고융점 세 라믹과 Fe, Mo, Ni, Co 및 Cr등의 금속을 소결복합한 재료로서 기계적 성질이 우수하여 절삭공구, 내열용 부품의 코팅에 사용되며 부식환경에 는 내식성이 우수한 Ni, NiCr 및 CoCr 등을 첨가하여 사용한다. 일반적 으로 혼합비 및 세라믹 분말의 입경이 코팅특성에 많은 영향을 미친다. WC-Co계는 500℃이하에서 변형이 일어나지 않지만 500℃이상에서는 W₂C 및 Co₃W₃C로 변형이 일어나는 특성을 가지고 있으므로 저온, 고속 용사법이 필요하다. Cr₂C₂계는 820℃의 고온에도 내마모성이 우수하지만 코팅의 미세구조가 불균일하고 산화반응을 일으키는 결점을 가지고 있 다. MoB-Ni계는 고온의 환경에 사용에 적합하여 MoB표면에 Ni를 진공 상태에서 코팅하여 사용한다.

2.5. 용사기술의 활용도와 제품적용

용사 피막 제품은 기재 혹은 모재를 피복하여 제조하기 때문에 물리적, 기계적 강도 특성을 갖는다. 표면 평활성이 우수하고 마모, 고온, 수용액 부식, 단열, 전기절연, 오염방지 및 유전특성을 갖고 평활한 면은 강판, 종이, 필름 등의 기초자재로부터 반도체 실리콘 웨이퍼, 액정에 사용되 는 액정 유리기판과 같은 장치나 설비의 구성재로 사용한다. 또한 화학 성분이 균일하여야 하며 긁힘 등의 결함이 없어야 하고 외부로부터 내 변형, 내마모 특성이 요구된다.

용사피막 제품은 친화성이 높고 방오성, 다공질 비금속화가 요구되며 향 후 자동차엔진의 발전용 가스터빈, 철강 연속 어닐링 로 내부의 롤, 반 도체 액정용 정전지그, 플라즈마 애칭용기 내부의 각종부자재, 에너지 가스터빈 고온 피복부재나 보일러 열교환용 강관, Nas 전지용기 등에 적용할 수 있다.³⁷⁾

01 11

III. 실험방법

3.1. 상용 분말

본 연구에서는 상용의 합금 분말을 이용하여 자용성 용사 기술에 적용 하였으며 분말 종류 및 제조사 등 관련 내용은 아래 [Table.3.1]에 나타 내었다.

[Table.3.1] 상용합금 분말의 시료

합금 분말	합금 특징	제조사
WOKA 3102	WC Base(88% WC)	Oerlikon
METCO 16C	Ni Base	Oerlikon
METCO 31C	Ni Base + WC 35%	Oerlikon
1360-20	Ni Base	Höganäs
1355-20	Ni Base	Höganäs
1355-20-35%	Ni Base + WC 35%	Höganäs

3.2. 분말 형상 입형 및 성분 분석

분말 입형 및 성분 등을 조사하기 위해 Jeol사의 JSM-6700F SEM을 사용하였으며 이때 가속전압 5.0kv, working distance는 21mm로 하고, 배율은 개별 입자의 크기와 해상도를 고려하여 관찰하였으며 EDX의 이미지 해상도는 512 by 340, 이미지 픽셀 크기는 2.78um, 가속전압 값은 5.0kv, 배율은 150으로 진행하였다.

3.3. 합금 분말 경도 시편 제작

합금 분말의 경도 특성을 확인하기 위해 수지를 이용하여 지름 30mm, 높이 20mm의 콜드마운팅 Mold를 제작하였다. 제작된 Mold 중심부에 직경 약 5mm, 깊이 3mm 이상으로 공간을 확보한 후 공간 내에 상용 합금 분말을 투입하고 강력접착제를 소량 혼합하여 경화시켰다. Mold 내에 경화시킨 분말을 그라인딩하여 구형 분말을 연마하여 편평하게 한 후 Polishing하여 경도 시편을 제작하였다.

3.4. 합금 분말 경도 특성 파악

합금 분말 경도 값을 측정하기 위하여 비커스 경도기(HM-210)를 이용 하였으며 하중 0.01Kgf, 측정시간을 15초로 설정한 다음 표면층의 경도 를 측정하였다. 이때 경도시험은 동일 시험편을 이용하여 최소 10회 이 상 실시하였으며 그 평균값은 각 시편의 경도 값으로 나타내었다.

3.5. Powder flame spray 공정을 이용한 용사 시편 제작

3.5.1. 용사 작업 조건 선정

용사 시편 제작 작업 조건 선정을 위해 3가지 가변 조건으로 실험을 진 행하였다. 작업 조건의 경우 용사 산업에서는 아세틸렌, 산소 양과 용사 건 거리로 조절하는 경우가 많기 때문에 3가지 변수(아세틸렌 양, 산소 양, 용사 건 거리)를 가변 조건으로 설정하고 작업 조건에 따른 분사 특 징과 경도 값을 분석하여 최적의 작업 조건을 도출하였다 용사 작업 조 건 변수는 [Table.3.2]와 같다.

3.5.2. 용사 시편 제작

선정된 작업 조건으로 롤의 base로 적용되는 모재 종류에 따른 분말 용 사 시험 후 경도 경향을 파악하기 위해 본 연구에서는 상용재인 STKM13A와 SCM440의 2종류를 모재로 사용하였으며 각각의 모재에 합금 분말을 용사하여 용사 시편을 제작하였다. 이때 시편의 크기는 각 각 지름 30mm, 높이 10mm, 용사코팅 두께는 1mm로 제작하였다.

3.5.3 용사 표면층 경도 측정

합금 분말을 용사한 시편의 경도 값을 측정하기 위하여 비커스 경도기 (HM-210)를 이용하였으며 하중 0.01Kgf, 측정시간을 15초로 설정한 다 음 표면층의 경도를 측정하였다. 이때 경도시험은 동일 시험편을 이용하

- 22 -

여 최소 10회 이상 실시하였으며 그 평균값은 각 시편의 경도 값으로 나타내었다.

3.5.4 최적화 조건 선정

합금 분말들의 용사 작업 조건, 표면층 경도 값 등을 분석하여 롤 제조 에 있어 최적화된 합금 분말과 작업 조건을 도출하였다.



		아세틸렌		1	
		산소	1	2	3
	200	아세틸렌		2	
		산소	1	2	3
		아세틸렌		3	
		산소	1	2	3
Q		아세틸렌		1	
· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	250	산소	JNA	2	3
건 거		아세틸렌		2	1
리		산소	1	2	3
(mm)		아세틸렌		3	R
		산소	1	2	3
1		아세틸렌		1	7
		산소	1	2	3
	300	아세틸렌	ru 0	2	
		산소		2	3
		아세틸렌		3	
		산소	1	2	3
					(kg/cm ²)

[Table.3.2] 최적의 작업조건 도출을 위한 작업 조건변수

- 24 -

3.6. 용사 시편 접합강도 측정

용사 전 시험편 조도 측정을 위해 먼저 시편에 대한 샌드블라스트를 진 행하였다. 샌드블라스트의 경우 0.5~1.0mm 크기의 aluminum oxide를 사 용하여 4.0~5.0kg/cm²의 압력으로 100~150mm의 거리를 유지한 채 45~90°각도로 tilting하면서 작업을 진행하였다. 표면거칠기의 정확한 측 정을 하기 위해 수준기로 수평을 맞춘 후에 컷오프 값은 0.8mm로 기준 길이는 컷오프 값의 5배인 4mm로 범위 값은 25um로 설정하였으며 시 험편 표면과 단면을 알코올로 세척한 후 측정 테이블 위에 올려놓고 이 송 장치를 작동시켜 측정하였다. 이송 장치로부터 산술 평균 거칠기(Ra) 측정하여 증폭기 및 기록기를 거친 다음 산술 평균 거칠기 값을 3회 측 정한 평균값을 데이터로 사용하였다. 모재의 조도가 접합강도에 미치는 영향도를 확인하기 위해 Ra 4.4~ 4.8과 Ra 5.0~ 5.5일 때 두 가지를 비 교하였다.

모재와 코팅층 사이의 접착력을 확인하기 위해 접합 강도시험을 실시하 였다. 이때 사용된 합금 분말은 Oerlikon사와 Höganäs사 분말인 Ni base와 Ni base + WC을 사용하였다.

용사 층 접합강도 시험의 경우 표준 공인 시험법이 없기 때문에 산업현 장에서 주로 사용하는 방법으로 진행하였으며 그 방법은 아래와 같다. 비커스 경도 측정기를 사용하여 용사층과 모재의 경계면에 대면각이 136°인 다이아몬드 입자를 하중 5kg, 유지시간 15초로하여 압입한 후 경 계면의 균열 발생 여부를 확인하였다. 이 때 객관적 신뢰도를 확보하기 위해 10개 시험편에 대한 접합강도시험을 실시하여 적합여부를 판단하 였다.

3.7. 충돌해석 시험

합금 분말이 모재와 충돌 시 모재 표면에 발생하는 잔류응력을 평가하 기 위해 시뮬레이션을 진행하였다. 시뮬레이션에 사용된 프로그램은 Radioss라는 비선형 충돌해석 프로그램으로써 비선형 동적 문제를 위한 주도적인 해석 솔버이다. 충돌 및 안전 성능, 구조물의 생산성을 개선하 기 위해 전 세계적으로 많은 산업군에 사용되고 있다.

본 연구에서 사용되는 상용 합금 분말은 Ni base와 Ni base +WC이다. 또한 모재를 강재로하여 시뮬레이션을 진행하여 이 두 가지 종류의 합 금 분말에 대해 잔류응력이 최소화되는 용사 건 거리를 시험하였다. 해석시험 조건은 [Table.3.3]와 같다.

[Table.3.3] 충돌해석 시험 조건

분말종류	Ni 합금분말, Ni + WC합금분말
용사건 거리 (mm)	200, 250, 300
상용 합금 분말 분사량 (g/min)	100
Nozzle 직경 (mm)	4
모재 재질	Steel

IV. 실험 결과

4.1. 분말 합금 특성

4.1.1. SEM 결과

상용합금 분말 시험편은 Carbon Tape에 합금 분말을 뿌린 상태에서 Pt 코팅만 진행한 상태에서 분석을 진행하였다. WOKA 3102 상용합금 분 말은 WC 88%로 실험에 사용되고 있는 다른 상용합금 분말들과는 달리 미세 분말이 Agglomeration을 거쳐 제조된 분말 형태를 이루고 있으며 그 외 나머지 상용합금 분말은 Ni base로 Gas Atomization 공정으로 제 조된 분말의 형태를 이루고 있다. 일반적으로 Agglomeration 공정으로 제조된 분말의 경우 통상 주된 입자크기보다 상당히 큰 겉보기 입자크 기를 나타내는 복수의 입자가 서로 밀접하게 붙어서 된 모임으로 정의 한다.⁴⁸⁾ 조립된 분말의 밀도는 공극량에 따라 상대적으로 달라지게 되며 소결시 국부적인 밀도 불균일 가능성이 크게된다. 따라서 용사 후 균일 한 기계적 특성을 발휘하기 위해서는 열처리 등 추가 공정이 필요할 것 으로 보이며 이에 따른 공수 증가 및 작업성 등에도 악영향을 미칠 수 있을 것으로 판단되어 본 용사 시험에서는 제외하였다.

Material	SEM 이미지
WOKA 3102 (WC Base / WC 88%)	
METCO16C (Ni Base)	
METCO 31C (Ni Base + WC35%)	
1360–20 (Ni Base)	
1355-20 (Ni Base)	
1355-20-35% (Ni Base + WC 35%)	

[Fig.4.1] 상용 합금 분말의 SEM 이미지

4.1.2. EDX 분석 결과

상용합금 분말을 EDX 분석 결과 상용합금 분말 data sheet와 큰 차이 는 없는 것으로 보이나 분말 종류에 따라 관련 sheet에 비해 점 분석 결 과 부위에 따라 다소 성분 차이는 있는 것으로 판단되었다. 이는 점 분 석의 경우 분말 각각의 성분 특성으로 검사 부위 및 분말에 따라 다소 차이가 나타나기 때문으로 판단되며 면 분석의 경우는 sheet값과 거의 유사한 것으로 판단된다. 하지만 Powder flame spray용사 코팅 후 fusing 공정 시 가열에 따른 확산으로 성분 균일화가 가능한 것으로 판 단되며 적용상의 문제점은 없는 것으로 파악하였다.





[Fig.4.2] METCO 16C EDX 분석



[Fig.4.3] METCO 31C EDX 분석



Image Name: Image Resolution: Image Pixel Size: Acc. Voltage: Magnification: Sieve analysis:

1360-20

1360-20-512 by 340-2.78 μm+ 5.0 kV+

150e 50 - 130 Micronse

[Fig.4.4] 1360-20 EDX 분석



[Fig.4.5] 1355-20 EDX 분석



[Fig.4.6] 1355-20-35% EDX 분석

4.2 합금 분말 경도 시험

경도 값이 가장 낮은 합금 분말은 1355-20으로 698.9Hv이고 가장 높은 경도를 가진 합금 분말은 1360-20으로 998.5Hv로 나타났다.

[Table.4.2]와 같이 입도가 다양하여 경도 측정 시 편차가 많이 발생하게 되어 평균 경도 값이 낮은 것으로 판단된다. 또한 [Fig.4.7]와 같이 합금 분말 시편 제작 시 그라인딩을 하게 되면 절삭된 분말의 표면이 다양한 형태로 나타나고 각 표면에 위치한 분말마다 깊이가 다르기 때문에 그 편차가 더 크게 나타날 수 있는 것으로 판단된다.

[1006.4.	'' >	뜨 곧 `		테근	ο⊥	70					
회차	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	평균
Metco16c	910	806.7	677.4	856.3	941.6	823.9	769.8	904.3	867.1	689.1	824.6
Metco 31c	944.2	820.4	823.1	969.3	964.5	967.2	932.1	789.4	867.3	807.9	888.5
1360-20	1012.2	981.4	1008.6	942.3	1024.1	994.1	988.4	1021.5	1014.3	998.7	998.5
1355-20	752.6	649	678.6	723.5	715.8	669.7	682.3	712.6	671.4	734.1	698.9
1355-20- 35%	835.2	678.1	972.9	866.2	953.1	645.2	932.6	899.7	912.8	752.1	844.7
											(Hv)

[Table.4.1] 각 분말 시편에 대한 경도 측정

- 35 -



[Table.4.2] 합금 분말에 대한 입도 분석

[Fig.4.7] 합금 분말 시편 제작 시 그라인딩 전후 합금 분말의 모식도

4.3 용사 작업조건 선정

용사 시편 제작 시 용사조건을 선정하기 위하여 산소, 아세틸렌, 용사 건 거리 등 3가지 변수 중 2가지는 고정하고 1개 변수를 가변시켜 얻은 결과를 [Fig.4.8], [Fig.4.9], [Fig.4.10]에 나타내었다. 산소 및 아세틸렌 양 은 각각 1kg/cm², 2kg/cm², 3kg/cm²으로 하고 용사 건 거리는 200mm, 250mm, 300mm으로 조건을 변화시켜 용사 작업을 수행한 결과를 아래 에 나타내었다.

- 산소 양이 부족한 경우 [Fig.4.8], [Fig.4.9], [Fig.4.10]의 산소 양 lkg/cm²의 그림과 같이 불완전 연소되어 붉은색의 불꽃을 일으키며 합금분말이 분사되지 않았고 과다한 경우 [Fig.4.8], [Fig.4.9], [Fig.4.10]의 산소 양 3kg/cm²의 그림과 같이 점화되지 않거나 점화되 더라도 푸른색의 불꽃을 일으키며 과도하게 연소되었다.
- 2. 아세틸렌 양이 부족한 경우 [Fig.4.8], [Fig.4.9], [Fig.4.10]의 아세틸 렌 양 1kg/cm²의 그림과 같이 낮은 열원으로 인해 합금 분말이 정상 적으로 용융되지 않은 상태에서 분사가 되었고 [Fig.4.8], [Fig.4.9], [Fig.4.10]의 아세틸렌 양 3kg/cm²의 그림과 같이 과다한 경우 연소가 되지 않거나 높은 열원으로 인해 합금분말이 완전히 용융되어 모재 와 충돌 시 적층되지 않고 흘러내리는 현상이 발생하였다.
- 산소, 아세틸렌 양이 동일한 상태에서 용사 건 거리가 200mm와 같
 이 너무 가까운 경우 용사 건과 모재 사이의 거리가 가까워 분사 시 합금 분말이 비산되었고 300mm와 같이 너무 멀어지면 합금 분말이

제대로 적층되지 않았다.

상기 결과 등을 종합적으로 분석한 결과 산소 양 3kg/cm², 아세틸렌 양 2kg/cm², 용사 건 거리 250mm 조건이 가장 최적화 조건으로 판단되었 다. 또한 아세틸렌 양 3kg/cm²을 초과하는 경우 산소 양보다 크게 되어 역류하는 현상이 발생하므로 최적화 조건에서 제외하였다.



	산소 양 (kg/cm ²)							
		1	2	3				
아세틸 렌 양 (kg/cm²)	1	합금 분말 용융x	합금 분말 용융x	용사 건 점화x				
	2	합금 분말 용융x	합금 분말 용융x	정상				
	3	불완전 연소	학금 분말 과다 용융	합금 분말 과다 용융				
		용사 건	거리 200mm	I				

[Fig.4.8] 용사 거리 200mm에서의 산소, 아세틸렌 양에 따른 용사 특징



[Fig.4.9] 용사 거리 250mm에서의 산소, 아세틸렌 양에 따른 용사 특징



[Fig.4.10] 용사 거리 300mm에서의 산소, 아세틸렌 양에 따른 용사 특징

4.4 용사 시편 경도 측정

합금분말과 용사시편 코팅층 경도 경향 차이가 발생한 것을 확인할 수 있었다. 합금 분말은 1360-20이 가장 높은 반면 용사 시편은 METCO 31C가 가장 높았다. 이는 재용융(fusing)과정 중 합금 분말들이 반 용융 상태에서 응고되면서 원자들의 확산으로 인해 경도 경향 차이가 발생할 수 있다. 또한 STKM13A와 SCM440의 2종류를 모재로 사용하였는데 모재의 종류와는 관계없이 비슷한 경도 경향을 보였다. 이는 용사코팅층 의 경도는 모재의 종류와는 관계가 없는 것을 확인할 수 있었다.

[Table.4.3] 각 용사 시편에 대한 경도 측정 결과

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	평균
Metco 16c	804.5	801.2	790.1	785.	790.1	785.4	777.2	790.2	780.2	780.2	788.8
Metco 31c	901.4	912.9	913.5	920.2	918.4	913	914.2	915.2	921.1	930.2	916.9
1360-20	845.6	848.2	837.6	841.8	845.4	837.2	845.6	838.7	843.7	843.6	842.7
1355-20	775.2	750.2	745.3	740.2	750.2	756.3	755.1	750.2	751.7	759.2	753.3
1355-20- 35%	850.2	834.2	880.2	878.2	890.5	877.2	857.2	890.4	882.4	871.2	871.2

(Hv)

4.5 용사 작업조건에 대한 경도 측정

[Table.4.4]에서는 각 작업조건 변수에 대한 경도 값을 나타내었다. 아세 틸렌과 산소 양이 적거나 과한 경우에는 점화가 되지 않거나 불완전 연 소가 되어 합금 분말이 분사되지 않았다. 용사 건 거리가 250mm이고 아세틸렌 양이 2kg/cm² 이고 산소 양이 3kg/cm² 인 경우가 가장 높은 경도 경향을 나타내었다.



[Table.4.4] 용사 작업조건에 따른 경도 값

	$1 \text{tr} \text{r}/\text{om}^2$			산소			
		Kg/CIII		1	2	3	
용 사 건 거 린 (mm)	200mm	아세틸렌	1	690	698	X	
			2	712	734	814	
			3	X	680	696	
	250mm	아세틸렌	1	724	730	Х	
			2	752	782	842	
			3	Х	710	718	
	300mm	아세틸렌	1	610	614	Х	
			2	712	634	740	
			3	Х	641	655	

 (Hv)

4.6 용사층 접합강도 측정

모재와 용사 코팅층의 접합강도 측정 결과이다.

조도값 Ra 4.4~4.8인 경우 METCO 31C에서는 모두 균열이 발생하였고 1360-20 역시 몇 개의 시편에서 균열이 발생하였다. 하지만, Ra 5.0~5.5 인 경우 METCO 31C와 1360-20 모두 균열이 발생하지 않았다.

따라서 시험편의 조도값이 Ra 5.0~5.5인 경우 접합강도가 높은 전처리 조건으로 확인하였다. Powder flame spray 용사 코팅은 모재의 종류와 는 상관없이 용사 코팅 전 전처리 조건에 따라 접합강도가 결정되는 것 을 확인하였다.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RA4.4~4.8 METCO 31C	균열	균열	균열	군열	균열	균열	균열	균열	균열	균열
RA4.4~4.8 1360-20	균열	양호	양호	균열	양호	양호	균열	양호	양호	균열
RA5.0~5.5 METCO 31C	양호	र इ								
RA5.0~5.5 1360-20	양호									

[Table.4.5] 압입 하중 5kg에서의 접합강도 측정 및 균열 여부 확인



[Fig.4.12] 조도값 Ra 5.0~5.5에서 5kg 하중으로 접합강도 측정

4.7 용사 건 거리에 따른 충돌해석시험

용사 건 거리에 따라 발생하는 모재 표면의 잔류응력 경향을 [Table.4.6]에서 확인할 수 있다. 4.5 용사 작업 조건에 대한 경도 측정과 유사하게 용사 건 거리에 따라 합금 분말들의 비산되는 정도가 다른 것 을 시뮬레이션에서도 동일하게 확인할 수 있었다. Ni base 합금 분말의 경우 용사 건 거리가 250mm일 때 모재가 받는 잔류응력의 경향이 낮음 을 확인할 수 있었다.

Ni base + WC의 경우 Ni base와는 다른 경향을 나타냈다. 용사 건 거 리가 멀어질수록 잔류응력이 낮아지는 것으로 나타나는데 이는 WC와 Ni합금분말의 밀도 차이 때문으로 보인다. 또한 Ni과 WC합금 분말을 비교했을 때 WC가 첨가되지 않은 Ni base 합금 분말인 경우가 전반적 으로 모재에 발생하는 잔류응력 값이 낮은 경향을 보였다.



[Fig.4.13] Ni base 합금 분말의 용사 건 거리에 따른 모재의 잔류응력 경향. 왼쪽부터 용사 건 거리 200mm, 250mm, 300mm

[Table.4.6] 용사 건 거리에 따른 잔류응력(Ni)

합금 / Spray 거리	중심부 Stress (scalar value)
Ni / 200mm	0.09
Ni / 250mm	0.04
Ni / 300mm	0.11



[Fig.4.14] Ni base + WC 합금 분말의 용사 건 거리에 따른 모재의 잔류응력 경향. 왼쪽부터 용사 건 거리 200mm, 250mm, 300mm

[Table.4.7] 용사 건 거리에 따른 잔류응력

4

합금 / Spray 거리	중심부 Stress (scalar value)
WC / 200mm	0.16
WC / 250mm	0.06
WC / 300mm	0.10

-

-

V. 결론

본 연구에 사용된 합금 분말 시료들은 상용 합금 분말로써 실제 산업에 서 많이 사용되고 있는 합금 분말들이다. 다만, 연구 목적에 맞게 철강 판재 이송 및 운반용 롤은 높은 내구성과 내식성, 내열성을 요한다. 이 에 따라 여섯 가지 상용합금 분말 중 가장 경도가 높은 코팅층을 가지 는 합금 분말을 선별할 수 있었고 이들 합금 분말들을 이용하여 실제 자용성 합금 용사공법(Powder flame spray)을 통해 철강 모재 위에 코 팅층을 생성하였다. 또한, 최적의 용사 작업 조건을 도출하기 위해 아세 틸렌과 산소 양 그리고 용사 건 거리를 가변 조건으로 설정하여 용사 작업 조건에 따른 합금 분말 분사 경향과 경도를 확인할 수 있었다. 마 지막으로 용사 코팅층과 모재의 계면의 접착강도를 측정하여 코팅층이 벗겨질 위험이 없는지 확인하였다. 이러한 실험을 통해 다음과 같은 주 요한 결론을 얻었다.

- (1) 합금 분말과 용사 시편에 대한 경도 경향 차이가 발생하였는데 이는 용사 과정 중 합금 분말이 재용용(fusing)되면서 원자들의 확산에 의해 경도 경향 차이가 발생하여 분말 경도에 비해 경도값 범위는 줄어드는 것으로 나타났다.
- (2) 용사 코팅층의 경도는 모재의 종류와는 관계없고 작업 조건(아 세틸렌, 산소 양, 용사 건 거리 등)에 따라서 경향 차이가 발생하 였다. 특히 작업 변수 중에서 용사 건 거리가 용사 시편 경도에 미치는 영향도가 큰 것으로 확인되었다.

(3) 모재의 조도값은 용사코팅층과의 접합강도에 큰 영향을 미치는 것으로 판단되어 본 연구 결과 모재의 조도값이 큰 경우 용사 코 팅층과의 결합력을 높일 수 있었으며 용사 작업 전 모재 표면에 대한 전처리가 필요함을 알 수 있었다.



참고문헌

- S. sakamoto, S. Tamagawa, A. Tsuda and Y. Moritka, "Development of Wrapper Roll by continuous Pouring Process for Cladding" Fujiko Technical Report 1993, No, 1, pp 9–20, 1993
- K. Ozaki, H. Miayzaki and T. Yoshimura, "New Methods for Evaluation of Thermal Spraying Coating Characteristics" Fujiko Technical Report 1997, no. 5. Pp. 25–27, 1997
- 3) P. Li, S. Sakamoto and H Saito, "High speed Steel Edger Roll in Hot Strip Mill by Continuous Pouring Process for Cladding" Fujiko Technical Report 1997, no 5, pp. 28–30, 1997
- H. Miyazaki and T. Yoshimura "Successful Applications of SHH-300 to Overlaying of Rolls and Rollers." Fujiko Technical Report 1997, no. 5, pp. 31-34, 1997
- Fujico, "Run-out Table Roller with Core Material SUS304 of Water Cooling Structure at Inside in Hot Strip Mill" Fujico Technical Report 1997, no 5, pp. 41–42 1997.
- K. Tani "Thermal spraying surface modification and its interaction with environment" Journal of the Japan Institute of Marine Engineering, vol. 46, no. 5, pp 20–25, 2011(in Japanese)
- A. Nakayama and K. Tanabe, "Potential for marine engineering applications of DLC films." Journal of the Japan Institute of Marine Engineering, vol. 46, no. 55, pp. 30–35, 2011(in Japanese)
- 8) K. Murakami, "Corrosion protection and antifouling properties of thermal sprayed metal coating" Journal of the Japan institute of Marine Engineering, vol. 46, no. 5, pp 40–45, 2011 (in Japanese)
- 9) B. H. Park "super-mirror Face Grinding Machine" patent No. 10-0564387m

2006. (in Korean)

- M. W. Bae, B. H. Park and H. Jung, "Performance characteristics of super-mirror face grinding machine using variable air pressure" Proceedings of 2011 KSAE Division Conference(KSAE11-B0350), pp. 1835–1840, 2011 (in Korean).
- C. W. LEE, J. H. Han, M. C. Shin and S. I. Kwun, "Effects of powder mixing on the mechanical properties of thermally sprayed WC-Co-Cr coating layers, "Journal of the Korean institute of metals and material, vol. 47, no. 5, pp. 290-296, 2009(in Korean)
- 12) K. Tani, "Thermal spraying surface modification and its interaction with environment", Journal of the Japan institute of Marine Engineering, vol. 46, no. 5, pp. 20–25, 2011 (in Japanese).
- 13) A. Nakayama and K. Tanabe, "potential for marine engineering applications of DLC films," Journal of the Japan institute of Marine engineering, vol. 46, no. 5, pp. 30–35, 2011 (in Japanese)
- 14) K. Murakami, "corrosion protection and antifouling properties of thermal sprayed metal coating", Journal of the japan institute of Marine Engineering vol. 46, no. 5, pp. 40–45, 2011 (in Japanese)
- 15) B. H. Park, "Super-mirror face Grinding Machine," Patent No. 10-0564387, 2006. (in Korean).
- 16) M. W. Bae, B. H. Park and H, jung, "performance characteristic of super-mirror face grinding machine using variable air pressure," proceedings of 2011 KSAE Division Conference(KSAE11-B0350), pp. 1835-1840, 2011 (in Korean).
- 17) J. S. Bengamin, metal. Trans. 135-139(1970),oct
- 18) 기계적 합금화한 Ni-based 자용성 합금분말의 용사 및 마모 특성에 관한 연 구 대한금속재료학회 1995. 대한금속재료학회 학술대회 개요집 Vol.1995 Nol. (1995) 한국항공대학교, 한국기계연구원 서성문, 이상율, 이보영

- 19) M Boas and M Bamberger, Wear, 126(1988)197-210
- 20) M. L. Thrope; Thermal spray : Industry in Transition Advanced Materials
 & Processes, 143(5) (1993) 50-54
- Herbert Herman; Advances in Thermal Spray Technology, Advanced Materials&Processes, 4(1990) 41-45
- 22) K. Tani and H, Nakahira; Status of Thermal Spray Technology in Japan, Journal of Thermal Spray Technology, 1(4) 333–339
- 23) Murakami. k.日刊工業新聞, 2001. 6 197-187
- 24) Murakami. k.日刊工業新聞, 2001. 9 148-164
- 25) Murakami. k.日刊工業新聞, 2002. 3 97-113
- 26) Journal of thermal spray technology, vol.10, no3, (2001), p.407
- 27) J.W.Luster, G.R.Heath, P.A.Kammer : Formation and Characterization of Corrosion-Resistant Amorphous coating by Thermal spraying, Material and Manufacturing Processes. 11–5(1996), 855–867
- 28) A.Borosiva, Y.Borisov, V.Korzhyk, V.Borik : Effect of spraying conditions on Amorhization and Properties of Thermal spray Coatings of FeCrMoNiB Alloy. Proceedings of the international Thermal spray conference, (1995). 749-754
- 29) 김병문, 황순영. 용사기술의 기본원리 및 용용. Journal of KWS. Vol. 20. No.3. August 2002
- A. Dauger, D. Fargeot, J.P. Laval, Phase Transformations in Solids, Metals Res. Soc. Symp. Proc. 21 (1984) 207
- 31) Metals Handbook, 5 (361-375)
- James H. Clare, Daryl E, Crawmer : "Metal handbook", 10th Edition, pp. 365
- 33) R. Suryanarayanan : Plasma Spraying(1993) 163-200
- 34) D.S Rickerby, A. Matthews : Advanced Surface Coating a Handbook of Surface Engineering, (1991) 217–243

- 35) Pina J, Dias A. M : Residual stresses in plasma sprayed coatings, 2nd plasma-technik-symposium 1991
- 36) Yves Pauleau : Materials and processes for surface and interface engineering, (1995) 245–284
- 37) Akira OHMORI, "Current Status of Thermal Spray Technology", Journal of the surface Finishing Society of Japan, 59(8), 2008, p484~489
- 38) K. Hidaka : Metallic powder for thermal spraying, 34-4 (2001), 223-229 (in Japanese)
- 39) 세라믹용사와 응용, 일간공업신문사, 1986, 19 (in Japanese)
- 40) 기능성 코팅, 일간공업신문사, 1986. 259-277 (in Japanese)
- 41) T. Itsukaichi : Cermet Materials for thermal spray and high velocity flame spaying, thermal spray. 38-4(2001), 235-241 (in Japanese)
- 42) J. Mckelliget and J. Szekely : Plasma Chem. And Plasma Process. 2(1982), 317
- 43) P. Fauchais : 31st Canadian Chemical Engineering Congress, 1983
- 44) P. Fauchais : int. summer school on plasma chemistry, (1987). 546-550
- R. Ghafouri-Azar, J. Mostaghimi and S. Chandra : Deposition Model of Thermal Spray Coatings, International Thermal spray conference 2001, (2001) 951–958(in Singapore)
- 46) J. Madejski : J. Heat Mass Transfer., 19(1976), 1009
- 47) HOVF로 제조된 WC-12Co 코팅의 기계적 특성 및 미세조직에 미치는 요사거 리의 영향. 인하대학교 방성식 2017
- 48) 분말 응집체의 치밀화에 관한 모델. Journal of Korean Powder metallurgy Institute. Vol. 11, No. 4, 2004. 한양대학교 김형섭

감사의 글

석사과정을 진행하면서 저의 학위논문이 잘 마무리될 수 있게 많은 분들의 도움이 있었습니다. 이 글을 통해 감사의 인사를 드리고자 합니다. 먼저 바쁘신 가운데에도 제 학위논문에 좋은 조언을 해주시고 대학원 생활 중 많은 도움을 주신 저의 지도교수님인 김권후 교수님께 감사드립니다. 또한 제 논문을 심사해 주신 남기우 교수님과 왕제필 교수님께도 깊은 감 사드립니다. 그리고 저의 학위논문을 무사히 마칠 수 있도록 항상 성심성 의껏 지도해주시고 대학생 시절부터 지금까지 인생에 있어서 많은 조언을 해주신 김순국 교수님께 진심으로 감사의 뜻을 전합니다. 교수님의 제자로 써 부족함 없는 연구자가 될 수 있도록 잘하겠습니다.

용사라는 새로운 학문을 알려주시고 본인의 일처럼 아낌없이 도와주신 새 한용사 반계범 이사님께 감사드립니다. 이사님의 도움이 없었다면 저의 학 위논문을 완성하지 못했을 것 같습니다. 이사님의 열정과 노력을 배워 더 욱더 성장하는 사람이 되겠습니다.

그리고 2014년 대학을 졸업하기도 전에 마그마코리아에 입사하여 막연하 게 대학원에 대한 꿈이 있었는데 공부를 병행하고 싶다는 제 뜻을 이해해 주시고 지원해주신 이재경 대표님께도 감사의 인사드립니다. 대표님의 조 언과 격려가 저에게 있어서는 큰 힘이 되었습니다. 앞으로도 마그마코리아 에서 큰 역할을 할 수 있도록 하겠습니다.

업무와 함께 공부를 병행하는데 있어 많은 이해와 도움을 주신 마그마 코 리아 임직원분들께 감사드립니다. 특히 조연상 이사님과 정재민 과장님께 서 이해해주시고 도와주신 덕분에 업무와 학업을 병행할 수 있었던 것 같 습니다. 학업 초기 일과 학업 병행하는 것이 힘들어 그만두려고 했을 때 큰 힘이 되어준 트리니티엔지니어링 박성민 부장님, 저의 학위논문 충돌 해석 부분에 있어 큰 도움을 주신 윤태식 이사님, 기대경 차장님, 마지막까지 대학원 생활을 도와주신 부경대학교 김기범 학생에게 감사드립니다.

제가 가장 존경하고 저의 버팀목인 아버지와 항상 자식들에게 사랑으로만 베푸시는 어머니께 감사드립니다. 학창 시절 사고만 치는 아들에게 부족함 없이 자라도록 항상 힘쓰셨던 것들 잊지 않고 앞으로 효도하겠습니다. 그 리고 저를 큰아들처럼 항상 챙겨주시는 장인어른, 장모님과 정말 가족처럼 따뜻하게 맞아주는 처제, 처남에게도 감사드립니다. 지금처럼 행복하게 잘 살도록 하겠습니다.

마지막으로 저의 사랑스러운 아내 윤보배씨에게 감사드립니다. 우리의 인 연이 만 10년째 되던 해에 우리 딸 복덩이를 출산하게 되어 너무나 기쁜 마음이지만 임신 기간 동안 일과 학업으로 인해 제대로 못 챙겨준 것만 같 아 미안한 마음뿐입니다. 그래도 혼자서 씩씩하게 복덩이 품고 꽃님이랑 못난 남편 뒷바라지한다고 고생 많았습니다. 앞으로 다시는 행복할 수 없 을 것처럼 사랑하도록 하겠습니다.

이외에도 여기에 미처 적지 못한 많은 분들께 감사드립니다. 여러분이 있 어 제가 있었고 저도 여러분께 힘이 될 수 있는 존재가 될 수 있도록 하겠 습니다. 감사하고 사랑합니다.

2022년 2월

박지웅 올림