

플라즈마 용사된 Cr₂O₃ 층의 연삭특성

김병희 · 서동수

충남대학교 공과대학 재료공학과

Grinding Characteristic of the Plasma-Sprayed Cr₂O₃ Coating Layer

Byoung Hee Kim and Dong Soo Suhr

Dept. of Materials Science and Engineering, Chungnam National University, Taejon, 305-764

(1998년 6월 22일 받음, 1998년 11월 11일 최종수정본 받음)

초 특 본 연구는 플라즈마 용사된 Cr₂O₃ 용사층의 연삭특성을 조사하기 위해 연삭특성에 영향을 미치는 연삭조건을 diamond 연마석의 입자크기, 절입량, 피연삭체 회전속도, 냉각수 공급량, 피연삭체 이송속도를 연삭변수로 하여 연삭면의 표면조도와 미세조직을 관찰하였다. 그 결과 # 325 diamond 연마석을 사용하여 연마한 후 절입량에 따른 용사층 연삭면의 취성과파괴-소성변형 전이점은 5~10 μ m의 범위였으며, 피연삭체 회전수의 경우에는 100rpm이었다. 또한 표면 미세조직 및 표면조도에 큰 영향을 미치는 연삭조건은 절입량, 연마석 입자크기, 피연삭체 회전수, 냉각수 공급량의 순서였다. 또한 lapping 후 용사층의 평균 표면조도는 0.1 μ m이었으며, 최대 표면조도는 1.9 μ m로 Cr₂O₃ 용사층의 표면 미세조직은 연삭면의 미세조직 및 표면조도에 영향을 주었다. 따라서 0.1 μ m 이하의 연삭면을 얻기 위해서는 용사층에 존재하는 기공을 최소화하기 위한 최적의 플라즈마 용사조건이 확립되어야 한다.

Abstract This study was performed to observe the surface roughness and microstructural change of the grinding surface of plasma sprayed Cr₂O₃ coating layer. The experimental conditions were particle size of diamond grinding stone, depth of cut, rotating speed and coolant feed. As a results, the grinding conditions influencing on the surface roughness and microstructure were depth of cut and the particle size of diamond grinding stone. In addition to the conversion of brittle-ductile fracture of grinding surface on depth of cut is 5~10 μ m and rotating speed was 100 r.p.m after grinding # 325 diamond grinding stone. The surface roughness of the Cr₂O₃ coating was not fallen less than R_a=0.1 μ m and R_{max}=1.9 μ m after lapping. That's why the surface roughness and microstructure of grinding surface was depended on the characteristics of as-sprayed coating. Therefore the most suitable plasma spraying conditions for minimizing the pore on coating layer must be founded to obtain the surface roughness under 0.1 μ m.

1. 서 론

세라믹재료는 알루미늄(Al₂O₃), 지르코니아(ZrO₂), 크로미아(Cr₂O₃) 등의 산화물계와 질화규소(Si₃N₄), 탄화규소(SiC) 등의 비산화물계가 기계부품이나 자동차부품에 적용되고 있다.¹⁾ 이들 재료 중에서 플라즈마 용사된 Cr₂O₃는 높은 경도와 내마모성 및 내 erosion이 우수하며, 부식저항성이 높기 때문에 펌프 실, 산업용 톨, 자동차의 피스톤 링, 그리고 내부식성이 요구되는 정밀인쇄용 세라믹 Anilox roll 등에 적용되고 있다.^{2~6)} 그러나 용사된 세라믹재료는 표면조도가 비교적 크기 때문에 기계부품으로 사용하기 위해서는 연삭법에 의해 가공이 필요하지만 세라믹은 경도가 높고 인성이 낮아 기계가공이 어려운 단점이 있어 대량생산 및 산업응用に 많은 제한을 받고 있다. 일반적으로 금속재료의 정밀가공에는 연삭가공, 방전가공, 전기화학적 연마가공 등이 개발되었으나 세라믹재료는 전기절연체로서 방전가공이 불가능하며, 화학적으로 안정하여 전기화학적 연마가공이 불가능하다. 따라서 세라믹재료의 가공에는 diamond 연마석을 이용한 연삭가공법이 이용되고 있

나, 아직도 연삭가공 방법은 확립되어 있지 않다. 세라믹재료의 연삭특성은 세라믹재료의 화학성분, 밀도, 경도, 영율, 굽힘강도, 파괴인성 등의 재료 특성에 따라 달라지게 되며 피연삭체가 용사법으로 제조된 세라믹 용사층일 경우에는 결정립 크기, 기공분포 및 크기, 결정결함 등에 영향을 받게 된다. 그러나 세라믹의 연삭가공 기술은 아직 확립되어 있지 않으며 또한 연삭가공에 대한 연구도 많이 보고되어 있지 않다. 특히 용사법에 의해 제조된 세라믹 용사층의 경면 연삭가공 기술은 know-how적 요소가 있어 이에 대한 기술정보는 공개되어 있지 않기 때문에 이에 대한 연구가 절실히 요구되고 있다.^{7~9)}

따라서 본 연구에서는 플라즈마 용사된 크로미아(Cr₂O₃) 세라믹 용사층의 연삭특성에 미치는 연삭가공 조건의 영향을 구명하기 위한 기초연구로써 연삭특성에 영향을 주는 변수로 diamond 연마석의 입자크기, 절입량, 피연삭체 회전속도, 냉각수 공급량, 피연삭체 이송속도등을 연삭변수로 Cr₂O₃ 용사층의 표면조도와 미세조직의 변화를 통하여 경면연삭조건을 확립하고자 하였다.

2. 실험 방법

본 연구에 사용된 용사용 분말은 순수한 Cr₂O₃ 용사분말(METCO 106)을 사용하였다. 금속모재는 SM45C 탄소강으로 직경 25mm× 길이 100mm의 봉 형태로 하여 연삭 가공이 용이하도록 가공하여 사용하였다. 용사 전 모재의 전처리로 250℃에서 1시간 탈지 후 아세톤으로 초음파 세척하여 모재 표면의 불순물을 제거하였다. 이렇게 준비된 시편은 80mesh의 알루미늄으로 브라스팅하여 모재 표면에 요철을 만든 후 표 1의 용사조건으로 용사를 하였다. 표 1의 용사조건으로 Cr₂O₃ 용사층의 연삭조건이 연삭가공에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 diamond 연마석의 입자크기, 절입량, 피연삭체 회전속도, 냉각수 공급량, 피연삭체 이송속도를 가공변수로 하였으며, 각 시편에 대한 연삭가공 조건은 표 2와 같다. 연삭실험에 사용된 diamond 연마석은 diamond 입자크기에 따라 3종류를 사용하였으며 규격 및 용도는 표 3과 같다. 사용한 diamond 연마석은 이화 diamond에서 구입하였으며 절삭유는 한국 하우톤의 Houghton Grind 577로 물에 1:600으로 희석하여 사용하였다. 연삭조건에 따른 연삭면의 표면 미세조직은 SEM으로 분석하였으며, 연삭면의 표면조도는 Taylor Hobson사의 Surtronic 3+을 이용하여 연삭 조건별로 10회 측정값을 평균하여 평균 표면조도(R_a)와 최대 표면조도(R_{max})

를 구하였다.

Table 1. Plasma spraying parameters.

Coating variable		Ceramic coating (Cr ₂ O ₃)
SPRAY GUN	gun type	MBN
	nozzle type	431
GAS		Ar-H ₂
	pressure- primary, psi	100
	- secondary, psi	80
	flow- primary	80
	- secondary	15
POWER	Ampere(A)	500
	Voltage(V)	75
POWDER FEED	feed rate indicator setting	70
	vibrator air pressure (psi)	25
	carrier gas flow	30
spray distance(mm)		60
gun traverse rate(mm/min)		300
rotating speed(r.p.m)		600

Table 2. Experimental conditions of grinding.

Grinding Stone	Parameters		Conditions	
diamond grinding stone # 325 (Rough Grinding)	depth of cut (μm)	5	Table speed(mm/min)	400
		15	Rotating speed(r.p.m.)	100
		30	coolant feed(l/min)	20
	rotating speed (r.p.m.)	46	Table speed(mm/min)	400
		100	Depth of cut(μm)	15
		360	Coolant feed(l/min)	20
	coolant feed (l/min)	10	Table speed(mm/min)	400
		20	Rotating speed(r.p.m.)	100
		30	depth of cut(μm)	15
# 600 diamond grinding stone (Middle Grinding)	depth of cut (μm)	2.5	Rotating speed(r.p.m.)	100
		5	Table speed(mm/min)	120
		10		
# 1000 diamond grinding stone (Fine Grinding)	depth of cut (μm)	2.5	Rotating speed(r.p.m.)	100
		5	Table speed(mm/min)	120
		10		
Lapping	Diamond cloth 15μm, 9μm		Rotating speed(r.p.m.)	220
			Table speed(mm/min)	300

*Wheel speed(r.p.m.) 1600

Table 3. Standard and uses of diamond grinding stone.

Diamond Grinding Stone	Diameter(mm)	Width(mm)	Uses
CM 325 R 100 BA 4	450	20	Rough Grinding
CM 600 R 100 BA 4	450	8	Middle & Fine Grinding
CM 1000 R 100 BA 4	450	8	Fine Grinding

3. 결과 및 고찰

용사법에서 세라믹 용사분말 입자는 고온의 플라즈마 화염에 의하여 용융되고 가속되어 모재에 부딪치면 소성변형이 일어나 넓게 퍼지게 되어 두께가 얇은 원판형으로 변형되고 응고된다. 용사층은 수많은 splat들이 차례 차례로 적층되어 형성되며, splat들이 적층되는 과정에서 여러가지 결함들이 유발될 수 있다.^{11,12)} 첫번째의 결함은 splat과 splat사이의 완전한 접합이 이루어지지 않아 생성되는 gap을 들 수 있으며, 이것은 세라믹 용융 입자의 온도가 강하되어 충분한 점성유동이 일어나지 않을 때 발생하는 것으로 생각된다. 이러한 gap이 생성되면 splat 사이의 접합강도 (cohesive strength)가 감소되어 균열의 전파가 gap을 통하여 일어나 취약한 용사층이 된다. 두번째의 결함은 세라믹 분말이 완전히 용융되지 않아 점성유동에 의한 변형이 적어, 완전한 원판형의 splat을 형성하지 못하고 응고되면, 표면이 거칠어지고, 이 위에 적층되는 splat은 먼저 응고된 불규칙한 표면형상을 완전히 덮을 수 없게 되어 기공이 생성되게 된다. 이렇게 생성된 기공은 용사층의 접합강도를 떨어뜨릴 뿐 아니라 연삭면의 표면조도를 열화시키는 원인이 된다. 세번째, 결함은 splat내에 존재하는 미세기공으로써 gas 용해도 차이에 의하여 생성되거나 아주 미세하여 연

삭면의 표면조도에는 영향을 미치지 않는다. 용사층에 존재하는 이러한 결함들은 연삭가공 중에 균열의 생성의 시발점으로 작용하고 미세한 표면조도를 얻을 수 없는 원인이 되어 연삭가공이 어렵고 또한 용사층은 이방성이 크기 때문에 연삭특성은 연삭방향에 크게 영향을 받게되어 세라믹 소결체와는 달리 경면연삭가공면을 얻기가 매우 어렵게 된다. 그러나 실제로 용사법에 의해 제조된 용사층의 결함(기공, 균열, gap 등)은 완전하게 피할 수는 없으며 따라서 적절한 용사분말의 선택과 최적의 용사조건 설정 등으로 용사층에 존재하는 결함을 최소화하는 것이 경면연삭면을 얻는데 필요하다. 그림 1은 표 1의 플라즈마 용사조건으로 용사된

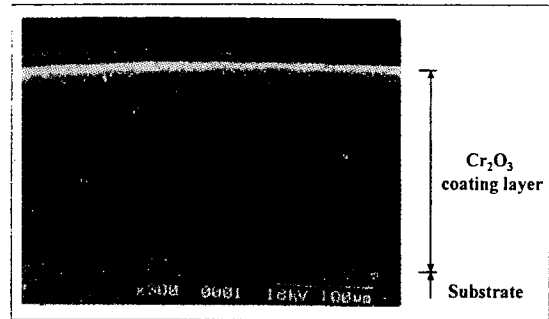


Fig 1. SEM microstructure of the Cr₂O₃ coating.

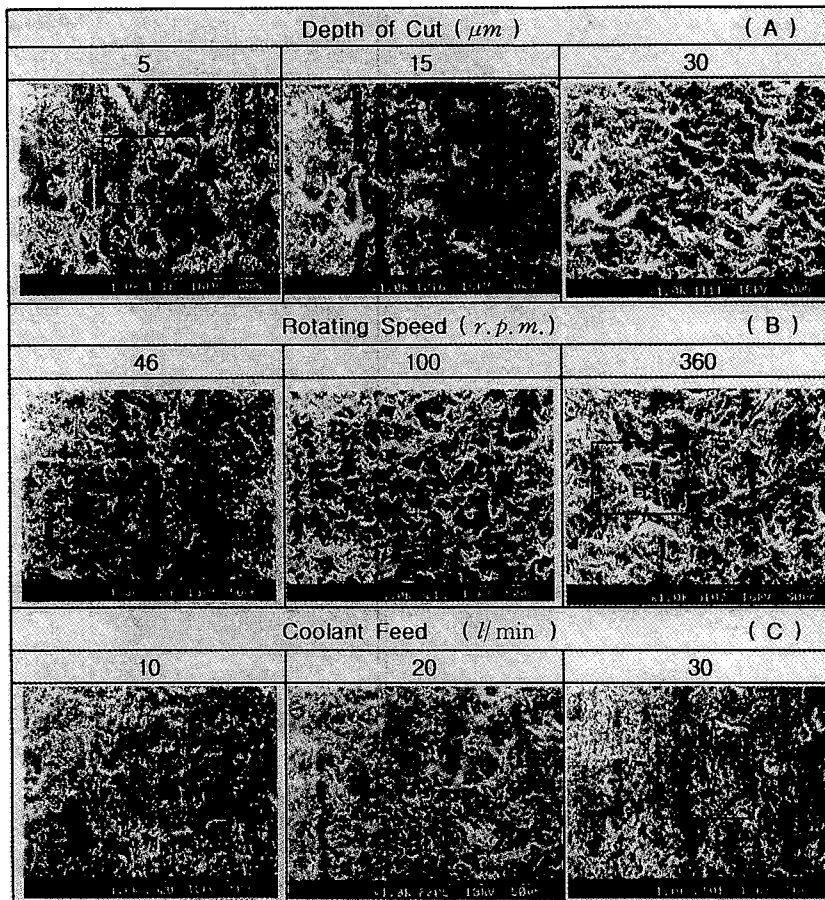


Fig. 2. SEM microstructure of the Cr₂O₃ coating after grinding with #325 diamond grinding stone depending on grinding conditions : (A) depth of cut (B) rotating speed (C) coolant feed.

Cr₂O₃ 세라믹 용사층의 SEM 단면 미세조직이다. 사진에서 관찰할 수 있듯이 용사층 내에는 많은 기공이 존재하여 불균일한 미세조직을 나타내고 있음을 알 수 있다. Cr₂O₃ 용사층의 표면조도 (R_{max})는 용사층내에 존재하는 기공의 크기 및 적층정도에 따라 좌우되며 크기가 큰 기공이 용사층에 존재하는 경우보다 크기가 작은 기공이 존재하는 것이 바람직하다. 사진에서 보이듯이 큰 기공의 크기는 대략 10 μ m 정도였다. 이와 같은 특성을 보이는 Cr₂O₃ 용사층의 연삭특성을 알아보기 위해 연삭 가공에 주로 영향을 미치는 연삭조건으로 절입량, 피연삭체 회전수, 냉각수 공급량, diamond 입자크기에 따라 연삭 특성을 조사하였으며 그 결과를 세부적으로 고찰해 보면 다음과 같다.

1. 절입량(depth of cut)의 영향

그림 2(a)는 #325 diamond 연마석을 사용하여 절입량을 5 μ m, 15 μ m, 30 μ m로 변화 시켰을 때, 연삭면의 표면 미세조직 사진이다. 절입량이 5 μ m에서 30 μ m으로 증가할수록 세라믹 용사층은 거친 표면상태를 보이고 있다. 이러한 현상은 절입량이 증가할수록 세라믹 용사층에 작용하는 응력이 높아져 용사층의 취성파괴가 일어나기 때문이라고 생각된다. 절입량이 30 μ m 일 경우에는 연삭가공 방향으로 취성파괴가 매우 심한 것을 관찰할 수 있으며, 용사층 내부에 존재하는 기공, gap등에 의하여 취성파괴가 발생되었음을 보이고 있다. 연삭가공면에서 취성파괴의 흔적이 없이 매끄러운 표면 형태를 보이는 부분은 splat과 splat사이에 존재하던 gap이 용사층이 박리 되면서 표면으로 노출된 부분으로 생각된다. 그리고 용사층 내부에 존재하던 많은 기공들은 표면에 노출되어 깊은 구멍형태를 이루고 있다. 또한 연삭가공면에 나타나는 소성변형 흔적은 연삭 가공 방향에 따라 줄무늬를 이루면서 형성되어 있음을 알 수 있다. 절입량 15 μ m의 경우에도 세라믹 용사층에는 취성파괴의 흔적을 발견할 수 있으나 절입량 30 μ m에 비하여 파괴의 정도는 완화되었고 소성변형 흔적은 많아졌다. 절입량 5 μ m의 경우에는 취성파괴 흔적은 거의 찾아볼 수 없는 반면에 넓은 면적을 갖는 소성변형 흔적이 많아짐을 볼 수 있다(그림 3(a)). 상기와 같은 연삭표면의 미세조직 변화로 볼 때, 플라즈마 용사된 Cr₂O₃ 세라믹 용사층의 절입량에 의한 취성파괴-소성변형으로의 전이점은 5~10 μ m의 범위에 있는 것으로 생각된다. 그림 4(a)는 절입량에 따른 표면조도 측정결과로서 절입량이 30 μ m일 때 표면조도 R_{max} =8.7 μ m이었으며, 절입량 15 μ m인 경우에는 절입량 30 μ m의 경우와 유사한 값을 보였으나 절입량의 5 μ m의 경우에는 R_{max} =5.2 μ m로 SEM 미세조직 분석에 의한 취성파괴-소성변형으로의 전이 결과와 잘 일치하고 있다.

2. 피연삭체 회전수의 영향

그림 2(b)는 절입량을 15 μ m로 일정하게 하고 피연삭체의 회전수를 360rpm, 100rpm, 46rpm으로 변화시켰을 때, 연삭면의 표면 미세조직을 나타낸 사진이다. 미세조직 사진에서 보면 360rpm 및 100rpm의 경우 용사층의 취성파괴 및 용사층 내부에 존재하던 여러가지 결함들이 표면으로 노출되었기 때문에 매우 불균일한 미세조직을 갖는 거친

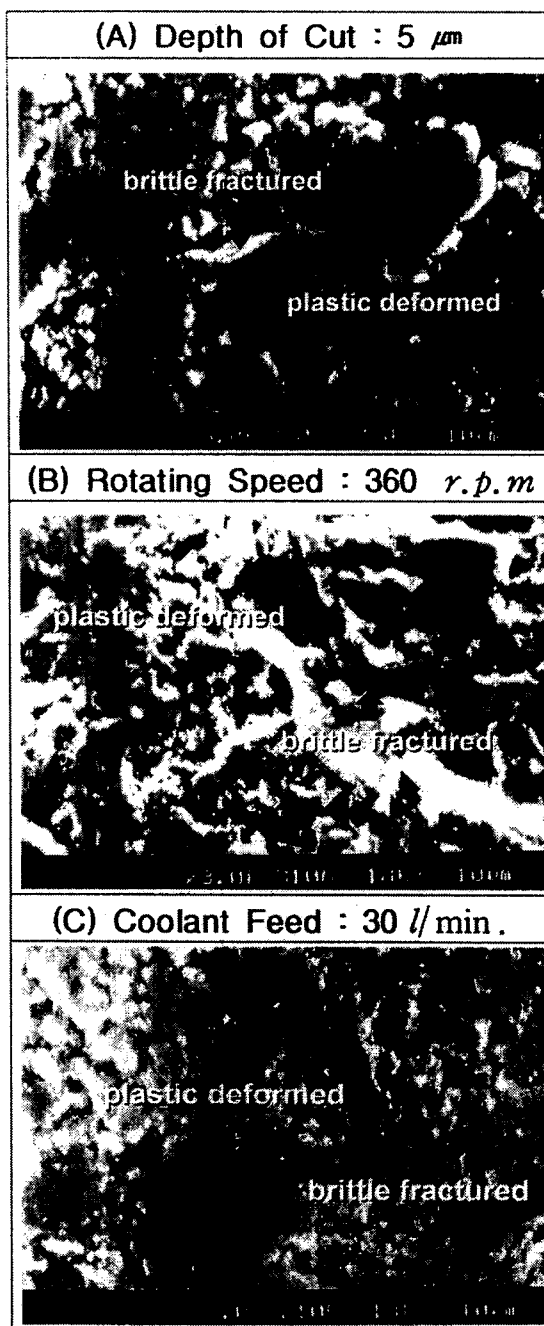


Fig. 3. SEM microstructure showing the brittle fracture and plastic deformation region in Fig. 2.(□).

표면상태를 보이고 있다(그림 3(b)). 그러나 360rpm보다 100rpm의 경우가 오히려 취성파괴가 더 심하며 소성변형 흔적이 적게 보인다. 이것은 피연삭체의 회전수가 빨라질수록 연삭체의 연삭저항이 감소하여 취성파괴가 적게 일어나기 때문으로 생각된다. 그러나 피연삭체의 회전수가 46rpm으로 더 낮아지면 소성변형 흔적은 많아지고 취성파괴의 흔적이 적어짐을 관찰할 수 있다. 따라서 피연삭체의 회전수에 의해서도 Cr₂O₃ 세라믹 용사층의 취성파괴-소성변형 전이는 일어나며, 그 전이점은 100rpm 이하에서 일어나고 있음을 알 수 있다. 그림 4(b)는 피연삭체 회전수에 따른 표면조도 측정결과로서 회전수가 360rpm, 100rpm,

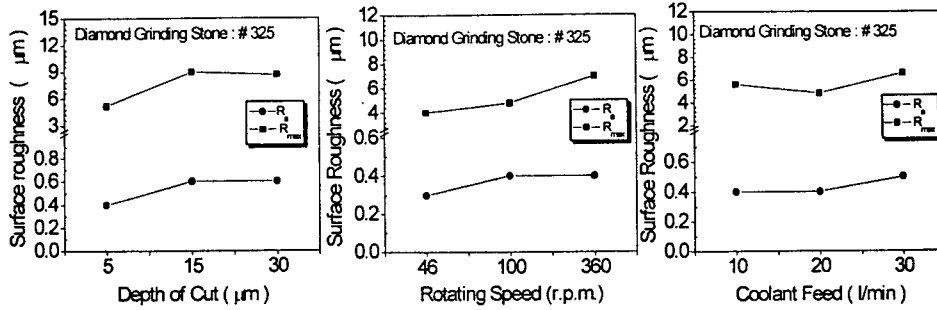


Fig. 4. Surface roughness change of Cr₂O₃ coating after grinding with # 325 diamond grinding stone depending on grinding conditions : (A) depth of cut (B) rotating speed and (C) coolant feed.

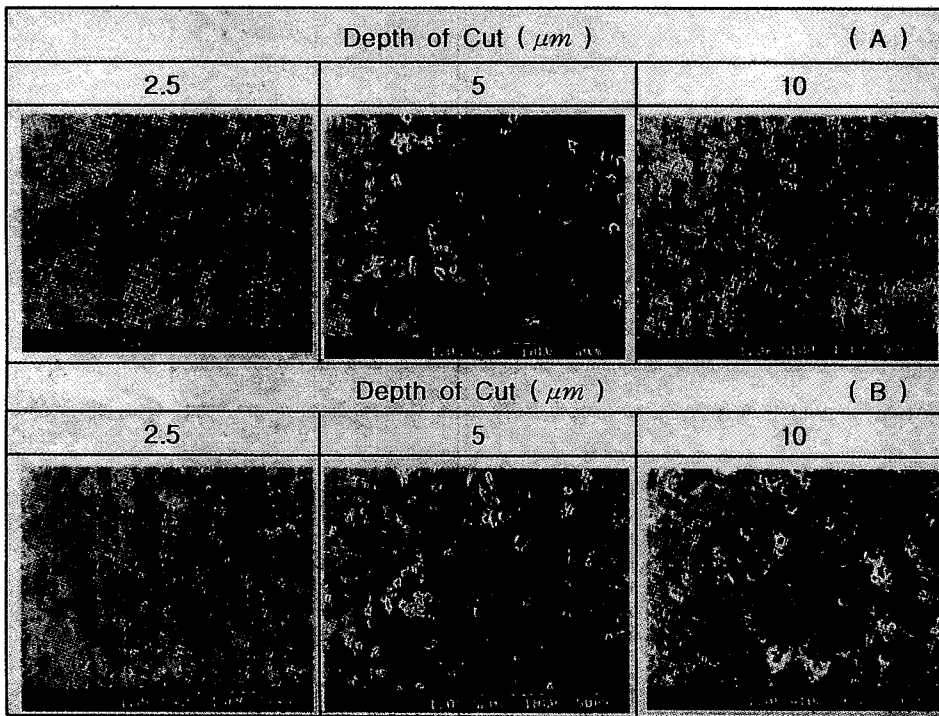


Fig. 5. SEM microstructure of the Cr₂O₃ coating depending on grinding conditions : depth of cut after (A) grinding with #600 and (B) #1000 diamond grinding stone.

46rpm으로 감소할수록 표면조도는 각각 R_{max}=7.0µm, 4.8µm, 4.0µm으로 감소하였으나 피연삭체의 회전수가 평균 표면조도 (R_a)에는 크게 영향을 주지는 않았음을 보였다.

3. 냉각수 공급량 (coolant feed)의 영향

냉각수 공급량이 연삭면의 표면 미세조직 및 표면조도에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 절입량을 15µm, 피연삭체 회전수 100rpm으로 연삭가공조건을 동일하게 하고 냉각수 공급량을 10 l/min, 20 l/min, 30 l/min로 변화시켜 연삭가공한 후 표면미세조직의 변화를 그림 2(c)에 보였다. 냉각수 공급량이 30 l/min인 경우가 20 l/min 보다 취성 파괴 흔적이 더 많이 관찰되고 있으며 10 l/min인 경우는 취성파괴 흔적은 적고 소성변형흔적이 더 많이 관찰되고 있다. 그러나 그림 4(c)에 나타난 표면조도 측정결과는 냉각수 공급량이 20 l/min인 경우가 R_{max}=4.8µm로 가장 낮은 값을 보였으며 이러한 결과는 미세조직사진에서 관찰한

결과와는 일치하지 않았다.

위의 결과들을 종합해볼 때, # 325 diamond 연마석으로 Cr₂O₃ 세라믹 용사층을 연삭조건에 따라 연삭한 후, 연삭 표면 미세조직 및 표면조도에 크게 영향을 미치는 연삭 조건은 절입량, 피연삭체의 회전수 그리고 냉각수 공급량의 순서임을 알 수 있었다.

4. 연마석의 입자크기 영향

표 2의 연삭조건으로 Cr₂O₃ 세라믹 용사층의 연삭특성에 미치는 연마석의 입자크기에 대한 영향을 알아보기 위해 #600 diamond 연마석을 이용하여 절입량을 2.5µm, 5µm, 10µm로 변화시켜 연삭한 후의 연삭면의 표면 미세조직을 그림 5에 나타냈다. 전체적인 표면 미세조직은 #325 diamond 연마석을 사용했을 경우에 비하여 취성파괴가 없는 매끄러운 연삭면을 보이고 있으나 절입량에 따라서는 큰 변화는 보이지 않았다. 이러한 현상의 주원인은 diamond 연

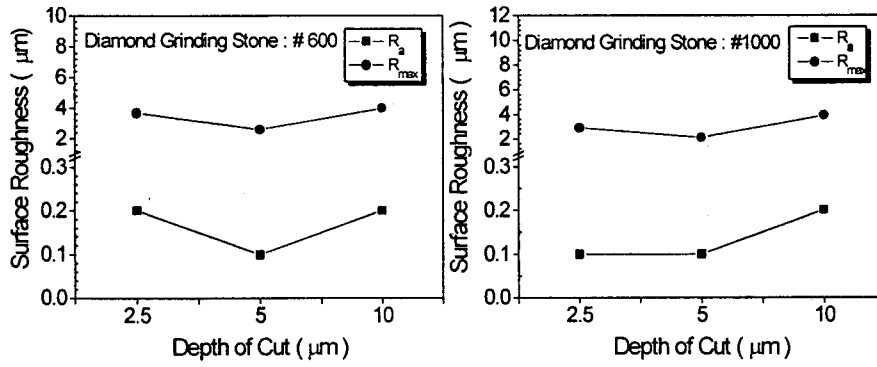


Fig. 6. Surface roughness change of Cr₂O₃ coating depending on grinding conditions : depth of cut after (A) grinding with # 600 and (B) # 1000 diamond grinding stone.

마석 입자크기가 작아 세라믹 용사층의 연삭가공중에 연삭면에 작용하는 응력이 작기 때문에 취성파괴가 일어나지 않기 때문이며, 또 다른 이유는 절입량이 취성파괴가 일어나는 임계값 이하가 되었기 때문이라 생각된다. 그리고 # 325 diamond 연마석을 사용했을 경우보다 연삭면이 미세해지면서 용사결함이 표면에 노출되어 존재하고 있음을 보이고 있다. 그림 6(a)는 표면조도 측정결과로서 연삭면의 평균 표면조도(R_a)는 절입량이 2.5μm, 5μm, 10μm 일 때 각각 0.2μm, 0.1μm, 0.2μm 이었으며, 최대 표면조도는 R_{max}=4.0μm, 2.6μm, 3.7μm이었다. 그러나 절입량이 2.5μm보다 5μm의 경우에서 표면조도 값이 더 낮은 값을 보였는데, 일반적으로 절입량이 증가하면 표면조도는 비례적으로 증가하지만 용사재료에 따라 상이한 결과를 보일 수 있다는 보고와 일치하는 결과이다.⁷⁾ 그리고 #1000 diamond 연마석을 사용하여 절입량을 2.5μm, 5μm, 10μm로 변화시켜 연삭 후 연삭면의 미세조직 변화를 그림 5(b)에 보였다. 연삭면은 취성파괴가 없이 매우 평활해진 것을 알 수 있으나 # 600 diamond 연마석을 사용한 결과와 마찬가지로 절입량의 영향은 구별할 수 없었다. 이때의 표면조도는 그림 6(b)와 같이 절입량에 따라 R_{max}=3.8~2.1μm를 보였으며, 평균표면조도는 0.1~0.2μm이었다. 그림 7은 연삭면에 남아 있는 연삭흔적을 제거하기 위하여 15μm 및 9μm 입자크기의 diamond cloth를 사용하여 피연삭체 회전수 220rpm, 이송속도 300mm/min으로 lapping한 후의 미세조직을 보인 사진이다. lapping 후 연마면은 연삭과정에서 나타나는 소성 변형흔적과 scratch가 없어지고 매우 매끄러운 표면이 형성되었음을 알 수 있다. lapping 후 연삭면의 평균 표면조도(R_a)는 0.1μm, R_{max}=1.9μm 이었으며 #1000 diamond 연마석을 사용한 후의 표면조도보다 최대표면조도는 약간 낮아졌으나 평균표면조도는 0.1μm 이하로 낮아지는 않았다. 이것은 Cr₂O₃ 세라믹 용사층에 존재하고 있는 기공에 의한 결과로 생각할 수 있으며 따라서 연삭에 의한 용사층의 표면조도를 낮추고 경면의 연삭면을 얻기 위해서는 기공을 최소화할 수 있는 용사변수를 확립하여 용사층을 제조하는 것이 필요하다.

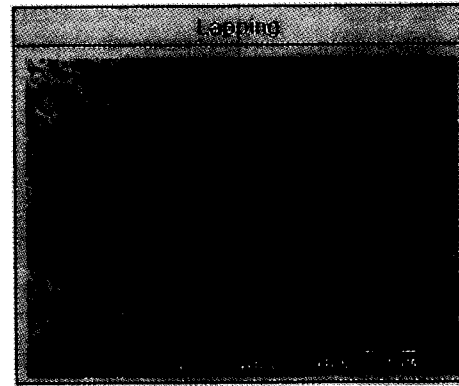


Fig. 7. SEM microstructure of the Cr₂O₃ coating after lapping.

4. 결 론

연삭가공 조건에 따른 Cr₂O₃ 세라믹 용사층의 표면조도 및 미세조직 변화에 미치는 영향을 조사한 연구결과는 다음과 같다.

- 1) 플라즈마 용사된 Cr₂O₃ 세라믹 용사층을 # 325 diamond 연마석을 사용하여 절입량에 따른 연삭면의 취성파괴-소성변형으로의 전이점은 5~10μm의 범위였으며 또한, 피연삭체 회전수의 경우에는 100rpm이었다.
- 2) 표면 미세조직 및 표면조도에 큰 영향을 미치는 연삭 조건은 절입량, 연마석 입자크기, 피 연삭체 회전수, 냉각수 공급량의 순서이었다.
- 3) # 600 및 # 1000 diamond 연마석을 사용하여 연삭한 후, 연삭면의 표면조도는 절입량이 5μm 인 경우에 가장 낮은 표면조도를 보였으며, 이때 R_a=0.1μm, R_{max}는 각각 2.6μm, 2.1μm이었다. 그리고 lapping 후 용사층의 평균 표면조도는 0.1μm 이었으며 최대 표면 조도는 1.9μm이었다.
- 4) 용사상태의 Cr₂O₃ 용사층의 미세조직은 연삭가공 후의 연삭면의 미세조직 및 표면조도에 영향을 주었으며, 0.1μm 이하의 표면조도를 얻기 위해서는 용사층에 존재하는 기공의 크기 및 분포를 최소화하기 위한 최적의 플라즈마 용사조건이 확립되어야 한다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부 공기반과제의 일부연구비로 수행 되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. M. Groc, L. Pawlowski and I. Smurov., Thermal Spray : Practical Solution for Engineering Problems, ASM International, 603 (1996)
2. L. Pawlowski., The Science and Engineering of Thermal Spray Coating, JOHNWILEY & SONS (1995)
3. A. Ibrahim, S. Sampath, Thermal Spray : Practical Solution for Engineering Problems, ASM International, 493 (1996)
4. SULZER METCO : MATERIALS GUIDE (1995)
5. 清水保雄, 日本溶射協會誌., Vol. 26 (3), H1124~H1130 (1989)
6. E. Lugscheider, I. Kvernes, surface Engineering of Diesel Engine Parts, Powder Metallurgy International, Vol. 24, No. 1 (1992)
7. 生田稔郎, Thermal Spray Technique, Vol.9, No.3, p. 50 (1990)
8. 宮崎國廣 : ダイヤモンド 砥粒, 表面研磨. 仕上技術集成, 日經技術圖書(株), p.131 (1984)
9. 田中義信, 津和秀夫, 井川直哉 : 精密工作法(上), 共立出版(株), p.157 (1982)
10. 小泉光惠, 津和秀夫, 難波義治, 早川茂 : セラミックスの超精密加工, 日刊工業新聞社, (1985)
11. S. Safai, Ph. D. Dissertation, State University of New York (1979)
12. R. McPherson, Surf. and Coat. Technol, Vol. 39/40, 173 (1989)