

# Plasma용사한 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-40%TiO<sub>2</sub>의 미끄럼마모특성에 미치는 용사조건에의 영향

The Effects of Spray Conditions on Sliding Wear Characteristics of  
Plasma Sprayed Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-40%TiO<sub>2</sub> Coating

이한영, 노정균\*, 배상규\*

계명대학교 재료공학과, \*계명대학교 재료공학과 대학원

**ABSTRACT** The plasma spray technics has known as one of the surface modification methods to improve the mechanical properties or the functional characteristics of materials. This paper has been aimed to investigate the effects of plasma sprayed conditions, such as spray distance and arc power level, on sliding wear properties of plasma sprayed Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-40%TiO<sub>2</sub> coating layer.

The sliding wear test using pin-on-disc type wear machine, has been conducted in several sliding speed for coating layer sprayed under different conditions.

The result of this paper is that the wear resistance of plasma sprayed Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-40%TiO<sub>2</sub> coating layer is fluctuated with the spray distance and the arc power level. The wear resistance could be improved with decreasing the spray distance and with increasing the arc power level.

## 1. 서론

용사기술은 모재보다 우수한 성질을 가진 재료를 가스 또는 전기 등의 열원을 이용하여 용융 또는 반응용상태로 모재의 표면에 고속 충돌시킴으로써 피막을 적층 형성하는 기술이다.<sup>1)</sup>

그러나 이러한 용사현상은 아주 복잡하여 아직 규명안된 부분이 많고 용사층의 신뢰성 및 안정성은 다소 결여<sup>1)</sup>되긴 하나 적용할 수 있는 소재가 금속을 필두로 세라믹스, 플라스틱에 까지 다양할 뿐만 아니고 이들의 조합도 가능하므로 응용범위가 넓고 처리가 용이하여 많은 연구<sup>2)~9)</sup>가 이루어지고 실제 광범위하게 적용이 되고 있는 기술이다.

근년 개발된 Arc 플라즈마 용사법은 노즐 출구의 온도가 약 15000℃에 달해 탄화물, 산화물, 질화물, 규화물 등과 같은 각종 고용 점재료의 용사가 가능할 뿐만아니라 에너지 밀도도 높아 가장 신뢰성이 있는 용사기술로 알려져 가장 널리 사용되고 있는 기술이다.

일반적으로 용사층의 물성은 용융입자의 용착시 속도, 온도 등에 의해 변하고 이들은 용사시 사용가스량, 분말입자의 크기 및 송급량, Arc Power level, 용사거리, 용사각도, 냉각조건 등에 의해 영향을 받는 것으로 알려져 있다.<sup>10)</sup> 이와같이 용사층의 성질에 미치는 영향인자가 많음에도 불구하고 현재 용사처리의 경우는 자동화 및 표준화가 미비하고 경험적으로 행해지고 있는 것이 대부분으로 용사층 품질의 재현성 저하를 초래하는 원인으로 사료된다. 이러한 이유로는 이들 영향인자가 용사층의 조직 및 성질에 미치는 영향이 정량적으로 밝혀지지 않았기 때문으로 생각된다.

따라서 본 연구에서는 용사조건이 용사층의 조직 및 성질에 미치는 영향을 정량적으로 규명하기 위하여 Arc 플라즈마 용사법으로 용사조건중 용사거리와 Arc Power Level에 변화를 주어 일반 구조용 탄소강 SM45C 금속표면위에 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-40%TiO<sub>2</sub>를 용사한 후 이들 변수에 따른 용사층의 성상을 비교하고

각각의 미끄럼마모특성을 규명하였다.

## 2. 실험방법

### 2-1 시험편제작

본 연구에서는 일반 구조용 탄소강으로 알려진 SM45C를 모재로 사용하였다.

우선 annealing상태의 SM45C환봉에서 미끄럼 마모시험을 위해  $6\phi \times 15\text{mm}$ 의 시편을 추출하였다. 그리고 밀착성 향상을 위해 용사처리전 시편단면에 대해  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 의 grit(입도 #46)를 이용하여 blasting(노즐압력 3.0bar)처리하였다. 용사전 시편의 표면거칠기는 평균  $6.5\mu\text{m}$ (Ra)정도인 것으로 확인되었다.

용사분말은 시판되는(미국 Norton사)  $45 \pm 5\mu\text{m}$ 크기의  $\text{Al}_2\text{O}_3$  및  $\text{TiO}_2$ 를 중량비로 60 : 40으로 혼합하고 송급량을 25g/min으로 일정하게 한 후 플라즈마 용사하였다.

플라즈마 1차가스로는 아르곤을 사용하여 80 SCFH로 일정하게 하고 용사거리 및 APL을 변수로 취하였다. 용사거리는 70mm, 80mm, 90mm로 변화시키고 APL은 30kW, 35kW, 40kW로 변화시켜 각조건에서 용사층의 두께를 약  $200\mu\text{m}$ 가 되도록 조절하였다. Table 1에 각 시편의 용사조건을 나타내었다.

또한 용사조건에 따른 잔류응력을 측정하기 위하여 동일성분의 판재에서  $20 \times 20 \times 4\text{mm}$ 의 사각형시편을 추출하여 표면적의 1/2을 masking한 후 Table 1과 동일조건에서 용사처리하고 비교를 위해 일부 용사조건을 추가하였다.

Table 1. Conditions of plasma spray

Index		Spray Distance (mm)	Arc Power Level (kW)	Voltage (V)	Current (A)
A	A1	70	30	60	500
	A2		35	70	
B	B1	80	30	60	
	B2		35	70	
C	C1	90	30	60	
	C3		40	80	

### 2-2 미끄럼마모시험

미끄럼마모시험은 Pin on Disc식 미끄럼마찰마모시험기<sup>11)</sup>를 사용하였다.

이때 모든 시험은 580g 단일하중에서 속도를 3~8m/sec범위에서 6속도(3, 4, 5, 6, 7, 8m/sec)를 선정하여 시험하였으며 총 마찰거리는 10km로 하였다.

이때 상대재<sup>11)</sup>로는 시판되는 M2고속도공구강(AISI)의 환봉에서  $\phi 65 \times 10\text{mm}$ 의 크기로 가공한 뒤 소정의 열처리를 하였다. 이때 경도는 HRC 61.5정도인 것으로 밝혀졌다.

미끄럼마모시험전 상대재는 접촉면을 #600 Abrasive paper로 마무리 가공하였으나 시편은 용사한 상태 그대로 시험하였다.

마모량은 소정의 거리마다의 중량감소정도로 산출하였으며 모든 시험은 대기중 무운활상 상태에서 행하였다.

### 2-3 X선응력측정

용사조건에 따른 잔류응력변화를 조사하기 위해 X선응력측정법<sup>12)</sup>을 이용하였다. 이때 용사층의 X선적 응력정수가 불명확하여 모재의 응력을 측정하여 유추하는 간접적인 방법을 취하였다. 즉 모재/용사층의 계면 그리고 용사층에서 6mm 떨어진 모재 두 부위에서 각각 응력측정하여 비교 분석하였다.

그리고 X선응력측정은 모재의  $\alpha\text{Fe}(211)$ 면을 검출기의 주사방식으로 병경법, X선입사방식으로  $\psi$  일정법을 취하여 X선응력측정법표준<sup>12)</sup>에 준하여 측정하였으며 측정조건을

Table 2. Conditions of X-ray Diffraction

Tube of X-ray	CrK $\alpha$
Diffraction Plane	$\alpha\text{Fe}(211)$
Current and Voltage	30 mA , 30 kV
Irradiation area	$2 \times 2\text{ mm}^2$
Time Constant	4 sec
Scan Speed	$2^\circ\ 2\theta/\text{min}$
Filter	V
Angle of $\psi$	$2.8^\circ, 5.3^\circ, 12.3^\circ, 19.3^\circ, 27.3^\circ, 35.3^\circ, 42.3^\circ$

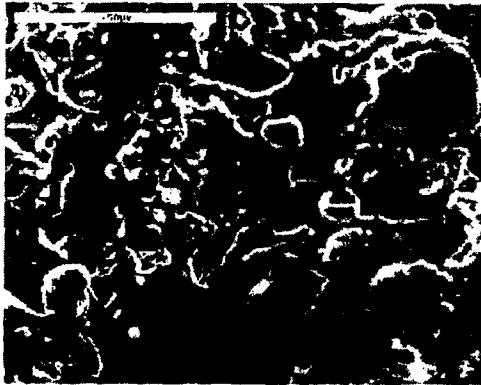


Fig.1 SEM Image of as-sprayed(C1)

Table 2에 나타내었다. 이때 잔류응력은  $\sin^2 \psi$  법으로 산출하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3-1 용사조건에 따른 용사층의 성상

Fig.1은 C1재에 대해 용사한 상태 그대로의 표면을 관찰한 일례를 나타낸 것이다. 일반적으로 용사거리가 적고 APL이 클수록 온도가 높고 용융입자의 운동량이 큰 것<sup>8)9)</sup>으로 알려져 본 연구의 용사층도 이러한 경향과 동일하게 용사거리가 적고 APL이 클수록 퍼짐성이 양호한 것으로 확인되었다.

Fig.2는 용사층단면의 SEM조직사진의 일례를 나타낸 것이다.

용사층내에는 소량의 기공이 존재하고 회색의 용사층과 짙은 회색의 부위가 공존하고 있음을 알 수 있다. 이중 용사층내의 회색 및 짙은 회색의 부위는 성분분석결과 어느 것도 성분조성과 동일한 것으로 밝혀져 이들의 성상차이는 불명확하였다.

Table 3은 각 용사조건에서 생성된 용사층의 경도 및 표면조도를 각각 10차례, 6차례 측정하고 기공율은 액중침량법으로 2차례 측정하여 각각 그 평균값을 나타낸 것이다.

그중 경도는 용사거리에는 관계없으나 APL에 따라 상이함을 알 수 있다. 즉 APL이 증대하면 경도상승이 관찰되어 일반적인 경향

<sup>8)9)</sup>과 동일하다. 그러나 40kW에서도 Hv 700정도로 APL이 35kW이상에서는 경도가 거의 유사한 것으로 추정된다.

기공율 및 표면조도는 일반적으로 용사거리 및 APL에 따라 변화하는 것으로 알려져 있으나 본 연구의 용사조건범위에서는 현저한 차이를 관찰 할 수 없었다.

Table 3. Properties of plasma sprayed layer according to spray conditions

Testpiece	Hardness (Hv)	Porosity (%)	Roughness ( $\mu\text{m}$ )			
			$R_a$	$R_z$	$R_{max}$	
A	A-1	667.9	1.9547	4.771	29.880	42.337
	A-2	703.9	1.4976	4.571	28.693	37.250
B	B-1	634.6	1.1580	4.008	26.809	34.924
	B-2	713.5	1.3214	4.969	30.144	39.995
C	C-1	652.2	1.2660	4.248	29.287	34.221
	C-3	694.1	1.3264	4.027	26.842	34.055

#### 3-2 용사조건에 따른 미끄럼마모특성

Fig.3은 A2재의 미끄럼거리에 따른 마모량의 변화를 나타낸 것이다.

이들 변화는 3, 4m/sec와 같은 저속도범위에서는 3km부근을 기점으로 정상마모가 초기마모보다 커지는 양상이나 7, 8m/sec와 같은 고속에서는 1km부근에서 정상마모가 초기마모보다 적어지는 경향임을 알 수 있다. 이러한 경향은 용사거리가 상이한 B, C 재의 경우에도 동일한 것으로 밝혀져  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -40%  $\text{TiO}_2$ 의 거리에 대한 마모특성의 특징으로

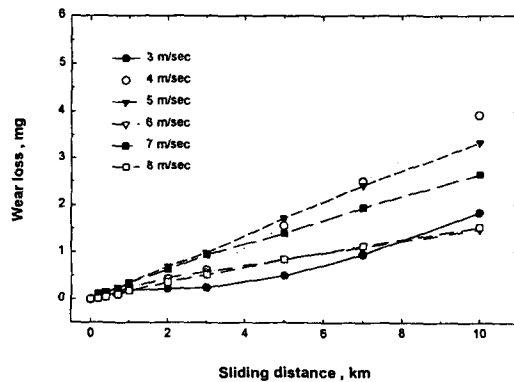


Fig.2 Wear Charecteriasics for sliding Distance(A2)

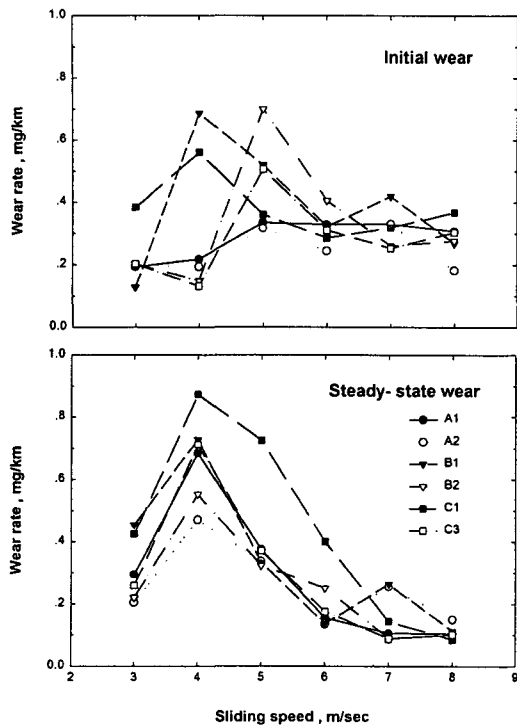


Fig.3 Wear Charecterisacs for sliding Speed

생각된다.

Fig.4는 초기마모영역 및 정상마모영역에서 산출된 각 속도에 대한 마모율변화를 비교한 것이다.

초기마모의 경우 A재는 APL에 관계없이 3, 4m/sec에서는 마모율이 적다가 5m/sec에서 다소 증대한 후 거의 일정해 지는 경향임을 알 수 있다. 그러나 B재, C재의 경우는 극대치를 보이고 있다. 극대치를 나타내는 속도는 APL에 따라 상이하야 30kw의 경우(B1, C1재)는 4m/sec이나 이상의 APL의 경우(B2, C3재)는 5m/sec에서 나타나고 있으나 극대치의 크기는 유사하다는 것을 알 수 있다. 이와같이 급증하는 속도가 상이한 것은 전술한대로 APL에 따른 용사층의 경도차이 때문인 것이 분명하다.

그러나 6m/sec이후의 고속에서는 용사조건과 관계없이 유사한 마모율을 보이고 있음을 알 수 있다.

정상마모의 경우 어느 것도 4m/sec에서 마모의 극대를 나타내고 속도증대에 따라 감소하는 마모곡선을 나타내고 있음을 알 수 있다.

그러나 그림에서도 알 수 있듯이 저속에서는 용사거리가 짧을수록, 또한 APL이 클수록 내마모성이 양호하나 7m/sec이후의 고속에서는 내마모성차이가 없어 지고 있다.

Fig.5는 C1시편의 3m/sec시험후 마모면을 관찰한 SEM사진을 나타낸 것이다. 그림에서는 표면에 소성유동된 층과 하부에 용사층이 공존하고 있음 알 수 있다. Fig.6은 이들 소성유동층의 성분분석결과를 나타낸 것이나 Fe, Cr 등 상대재의 성분이 검출되어 용사층과 상대재에서 전이된 마모입자가 소성유동

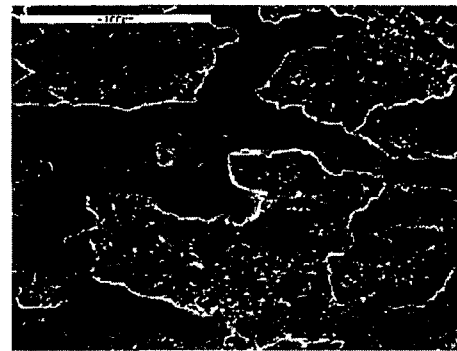


Fig.5 SEM image of worn surface (A2, 3m/sec)

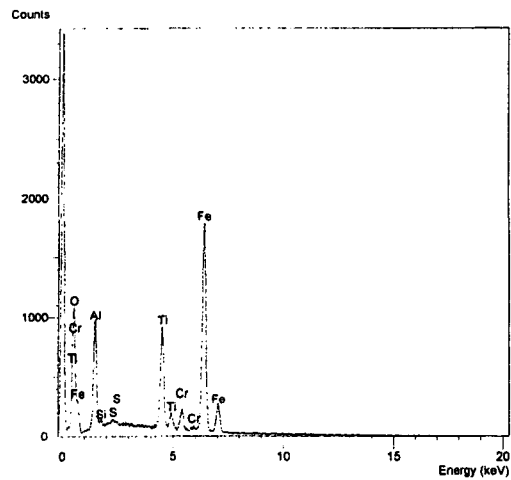


Fig.6 Result of EDS analysis of upper layer (A2, 3m/sec)

된 것임을 알 수 있다.

그러나 하부는 순수한 용사층인 것으로 확인되었다. 결국 저속시 시편의 마모는 상대재와의 응착에 의해 발생한 이착물이 용사층과 함께 소성유동을 일으켜 이들의 탈락정도가 마모량을 지배한다는 것을 알 수 있다. 따라서 저속시 마모가 현저하였던 것은 이러한 소성유동층과 상대재와의 응착력이 증대하였기 때문으로 추정된다. 그리고 3m/sec에 비해 4m/sec가 내마모성이 열악하였던 것은 속도상승으로 인한 시편의 온도상승이 커서 응착후 전단이 시편측에서 발생하기 때문인 것으로 생각된다.

반면 고속시에도 전면에 소성유동된 층이 관찰되었으나 이들은 Al, Ti만으로 구성된 것으로 밝혀져 고속에서는 시편의 온도상승으로 인한 강도가 저하가 현저하므로 용사층이 소성유동되어 막을 형성한다는 것을 알 수 있다. 이러한 측면에서 고속에서 내마모성이 증대하였던 것은 소성유동된 용사층막이 보호피막역할을 하기 때문으로 생각된다.

### 3-3 용사조건에 따른 응력변화

이상의 결과에서 용사조건에 따른 용사층의 내마모성은 표면의 소성유동층과 용사층과의 계면 전단강도가 커다란 역할을 하는 것으로 추정할 수 있다.

일반적으로 전단강도는 경도와 상관관계를 가지므로 APL이 높을수록 내마모성이 양호하였던 것은 경도상승에 따른 전단강도 상승 때문임이 틀림없다. 그러나 용사거리에 따른 내마모성은 경도차이는 거의 없음에도 불구하고 차이가 나타난 것은 전단강도에 영향을 미치는 다른 요인으로 생각하는 것이 타당할 것이다. 이러한 요인으로 용사층내의 잔류응력을 생각할 수 있다.

일반적으로 용사층에는 압축의 잔류응력이 존재하고 직하의 모재는 인장의 잔류응력을 가지는 것으로 알려져 있다.<sup>5)~8)</sup>

Table 4는 용사층의 열응력에 의한 잔류응

력 크기를 추정하기 위해 모재 및 계면의 잔류응력을 측정된 결과를 비교한 것이다.

일반적으로 용사거리가 짧고 APL이 증대할수록 온도가 높아 입열량이 크므로 발생하는 열응력도 클 것이 예상된다. 그러나 측정결과 모재속의 응력은 인장, 압축의 형태가 혼재하고 계면에서는 전부 압축의 잔류응력을 보이고 있으나 용사조건에 따른 상관성이 없음을 알 수 있다. 사실 잔류응력은 열에 의해서도 생성되나 생성된 열응력에 의해 소성변형 및 균열발생을 하면 응력이 재분포되어 응력값은 변화한다. 따라서 이러한 잔류응력의 변화는 용사층의 응력과 모재의 응력이 동시에 재분포되므로 결국 용사층내의 응력은 모재의 응력과 계면의 응력차( $\Delta RS$ , matrix-interface)로 얻어질 것이 분명하다. 이를 표 오른쪽에 나타내었다. 이 값이 클수록 용사층내의 잔류응력은 크며 +는 압축잔류응력 -는 인장의 잔류응력을 나타내게 된다. 그 결과 용사거리 70mm, APL 35kW, 40kW시만 압축의 잔류응력이 크게 감소하여 용사층내에는 인장의 잔류응력이 생성되었다는 것을 알 수 있다. 그러나 이것을 제외하면 전반적으로 용사거리가 감소할수록  $\Delta RS$ 가 커져 용사층내의 압축의 잔류응력이 크게 증대하고 있어 용사거리가 짧을수록 내마모성이 좋아진 결과와 일치함을 알 수 있다.

그러나 동일한 용사거리에서는 APL이 높아질수록 온도도 높아지므로 잔류응력발생이 클 것으로 예측되나 표에서는 오히려 변화폭이 적어져 압축잔류응력이 감소하고 있음을 알 수 있다. 특히 용사거리 70mm, APL 35kW, 40kW시는 인장의 잔류응력이 생성되었다. 이것은 과대한 열응력에 의한 잔류응력발생으로 국부적인 소성변형이나 미세균열 발생 등과 같은 응력해방과 관련된 현상이 일어났음을 시사하는 현상으로 추측된다. 실제 일부 시편에서 용사층 직하계면에서의 균열이 관찰되었으나 용사처리시 발생한 것 인지 단면조직관찰을 위해 절단시 생성된 것

**Table 3. Result of residual stress measurement by X-ray diffraction**

Spray Distance (mm)	Spray Power (kW)	at Matrix (MPa)	at Interface (MPa)	ΔRS (MPa)
70	30	122.99	-65.07	188.06
	35	-134.26	-105.58	-28.68
	40	-76.15	0.78	-76.93
80	30	-5.00	-160.33	155.33
	35	46.65	-41.75	88.40
	40	-45.67	-112.70	67.03
90	30	101.53	-47.04	148.57
	35	-47.92	-93.89	45.97
	40	-88.00	-130.51	42.51

인지는 불명확하였다.

결국 용사층의 내마모성은 용사거리가 짧고 APL이 클수록 양호하였으나 이것은 이들 영향인자에 의해 압축잔류응력증대 및 온도 상승으로 인한 것임을 알 수 있다. 그러나 열응력이 너무 과도하면 용사층직하 계면에서의 균열발생의 가능성을 배재할 수 없어 다른 기계적성질에 악영향을 미칠 것이 예상되므로 최소한 인장의 잔류응력이 생성되지 않는 범위의 용사조건이 적절한 것으로 추측된다.

#### 4. 결 론

Plasma용사에 의한 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-40%TiO<sub>2</sub>용사층의 미끄럼 마모특성에 미치는 용사거리 및 Arc Power Level등과 같은 용사조건에 영향을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 저속에서의 내마모성은 용사거리가 짧고 Arc Power Level이 높을수록 우수한 것으로 밝혀 졌으나 고속에서의 내마모성은 용사조건과 무관한 것으로 밝혀졌다
- 2) 용사층의 마모진행은 저속에서는 상대재의 이차물과 용사층의 소성유동층이 형성되고 고속에서는 용사층만의 소성유동층이 형성되어 이들의 탈락정도가 내마모성을 지배하였다.

결국 저속에서는 용사거리가 짧을수록 압

축잔류응력이 증대하고 Arc Power Level이 높을수록 경도가 높아져 용사층의 전단강도를 향상시키기 때문에 내마모성이 우수한 것으로 밝혀졌으나 고속에서는 온도상승이 현저해져 용사조건에 따른 차이가 없어지기 때문으로 생각되었다.

- 3) 내마모성을 고려한 최적의 용사조건은 열응력 발생이 높은 조건이 적절하나 너무 과도하여 용사층에 인장의 잔류응력발생은 적절하지 않을 것으로 추정되었다.

#### 5. 참고문헌

- 1) 不二越表面強化研究会：“知りたい表面強化”、ジャパニマシニスト、日本(1988)263
- 2) J.E.Fernandez, R.Rodriguez, Yinglong Wang, R.Vijande, A.Rincon : Wear, 181-183(1995)417
- 3) J.M.Coetos, J.E.Fernandez, R.Vijande : Wear, 169(1993)173
- 4) A.J.Bull, R.Kingswell, K.T.Scott : Surface and Coating Technology, 82, (1996)218
- 5) R.Vijande, J.Belzunce, J.E.Fernandez, R.Rincon, M.C.Perez : Wear, 148, (1991)221
- 6) R.McPherson : Surface and Coating Technology, 39/40(1989)173
- 7) R.Nicoll : Meeting H.school Technike, Gijon, Spain, (1990)11
- 8) H.P.Steffen, M.Dvorak, ASM Intl. Materials park, USA,(1990)207
- 9) 김정수, 이상동, 권혁상 : 제8회용사기술 Workshop ,(1998)53
- 10) 용사Handbook
- 11) 이한영, 배종수, 김용진 : 윤활학회지, 15, 2(1999)156
- 12) 日本材料学会：“X線応力測定法標準”, (1982)