

기능성 용사피막의 마찰속도에 따른 마찰·마모특성 평가에 관한 연구
A Study on the Evaluation of the Friction and Wear Properties of the Sprayed Coating Layer along with the Friction Velocities

김영식^{*}, 김윤해^{*}, 김종호^{**}, * 양경성^{***}

+ 한국해양대학교 재료공학과
 ** 한국해양대학교 기관공학과
 *** 한국해양대학교 재료공학과

1. 서론

마모량은 기계수명을 결정하는 중요한 인자중의 하나이므로 기계수명을 연장하기 위해서는 기계부품의 내마모성 향상이 필수적이다. 기계부품의 내마모성을 향상시키기 위한 방법으로 표면처리 방법이 일반적으로 이용되고 있으며, 여러 표면처리 방법 중에서 용사법은 비교적 최근에 발달한 기술로서 여러 가지 장점을 가지고 있으므로 그 응용범위가 매우 다양해지고 있다. 즉 용사법은 초기비용이 높다 하더라도 기계설비의 정지시에 수반되는 손실이나 치환공사비 등이 대폭으로 삭감될 수 있다는 장점과 CVD와 PVD 등의 기타 성막수법에 비해 복잡한 곡면 형상이나 대형 피막을 형성할 수 있다는 것, 성막 속도가 빠르고, 광범위한 용도·사용조건에 대응 가능하다는 장점들을 가지고 있으며, 내마모성이 특히 우수하다는 장점을 갖고 있다. 이러한 장점으로 인해 용사법은 각종 기계류부품의 표면처리방법으로서, 또는 사용중 마모손상된 부위의 수리·보수목적으로 널리 이용이 검토되고 있다.

본 연구에서는 내마모용으로 이용되고 있는 금속계 용사분말과 세라믹계 용사분말을 이용한 용사피막에 대해 그 마찰·마모특성을 상호비교·고찰하고 건식과 윤활조건 아래서 이들 용사피막의 마찰속도에 따른 마찰·마모특성을 고찰하여 저속, 중속, 고속의 각 조건에서 어떤 용사피막재료가 가장 적합한가에 대해 규명하였다.

2. 실험방법

2.1 시험편의 제작

Disk(8×49φ)형 단강재 표면에 내마모성 재료로 널리 사용되고 있는 금속계인 Mo, Fe, SUS42C, Al-Bronze, Ni-Cr 용사분말과 세라믹계인 Al₂O₃, TiO₂의 용사분말을 산소-아세틸렌 가스플라즈마를 이용한 분말식 플레임(Flame)용사기를 사용하여 용사피막을 형성한 후 동일하게 표면 연마 한 다음 교경도의 텀스텐 Pin(12×5φ)을 상대 마모재로 하여 마찰·마모 실험을 실시하였다. Table 1은 본 실험에 사용한 각 용사피막의 용사조건을 나타낸 것으로 이에 따라 용사피막을 형성하였다. Table 2는 각 용사분말의 화학조성을 나타낸 것이다.

2.2 실험장치 및 실험방법

본 실험에 사용한 마찰·마모시험기는 ball on disk type 마찰·마모시험기이며, Fig. 1과 같이 인가하중이 Pin에 직접 작용하고, 인가하중 자체만이 Disk에 인가되도록 하기 위해 Balance Bar를 수평으로 조작하여 실험을 행하였고, Fig. 2와 같이 Disk와 Pin의 마찰에 의해 생긴 미끄럼 마찰력이 밸런스바를 거쳐 Load cell로 전달된 후 Amplifier를 통해 증폭되어, 증폭된 힘을 Pen Recorder상에 기록함으로써 각 분말 용사 피막의 마찰력 및 마찰계수를 측정하였다. 단, 이때

전달된 힘은 암의 길이 a에 의해 미끄럼 마찰력의 $\frac{a}{25}$ 가 되므로 아래식을 통해 마찰력 및 마찰계수를 측정하였다. 즉 마찰력은

$$F = \frac{25}{a} T$$

$$\mu = \frac{F}{P}$$

T : Pen Recorder 상에 기록된 힘
 F : Friction Force
 a : Length of Arm
 μ : Friction Coefficient
 P : Applied Weight

이 고 마찰계수는 아래식을 통해 구하였다.

건식조건 하에서는 인가하중을 20.45N으로 일정하게 하였고, 마찰속도를 0.1m/sec, 1.0m/sec, 1.8m/sec로 변화시켜 마찰·마모 실험을 행하였다. 또한 현재 기계부품들이 여러가지 제약으로 표면에 충분한 윤활유를 공급하지 못하는 경우를 상정하여, 일반 엔진 윤활유에 10분간 1회 침지한 후 30분간 방치하여 가혹한 윤활조건이 되도록 하여 윤활상태(Lubrication Condition)실험을 행하였다. 또한 윤활시에는 더욱 조건을 가혹하도록 하기 위해 인가하중을 122.49N으로 하여 용사피막의 油膜지속성을 평가하였다. 그리고 각 시험편의 용사피막의 경도는 마이크로-비커스 경도시험기를 사용하여 압자하중 500gf, 부하시간 10sec로 하여 용사피막 단면부에서 각 용사피막의 미소경도를 측정하였다. Disk의 마모량은 중량추정기를 사용하여 시험전의 디스크 중량과 시험 후의 디스크 중량의 차이를 12회 측정하여 최대값과 최소값을 제외하고, 그 평균값을 마모량으로 하였다. 또한 강봉을 두 개 제작하여 두 개의 강봉을 볼트와 너트로 체결한 다음 표면을 기계가공 한 후 그 위에 용사처리하여 용사피막의 인장강도실험을 행하였다. 인장강도 실험 후 용사피막의 두께를 측정하여 파단강도를 용사층의 단면적으로 나누어 각 분말 용사 피막의 인장강도를 구하였다.

3. 실험결과 및 고찰

① Fig. 3은 용사피막 단면부에서 각 용사피막의 미소경도를 측정한 결과로서 Mo 용사피막 표면의 경도가 가장 높고 TiO₂, Al₂O₃, SUS42C, Ni-Cr, Fe, Al-Bronze 용사피막 표면 順으로 경도가 낮아짐을 알 수 있다. 여기서 Mo, TiO₂, Al₂O₃의 Hv값이 600~700정도에 육박하고 있어 매우 경한 표면층임을 알 수 있고, Al-Bronze 용사피막표면은 Hv값이 200정도 이므로 연성이 풍부한 표면층임을 알 수 있다.

② Fig. 4~6은 각 용사처리 표면에 대해 건식조건 하에서, 인가하중 20.45N으로 마찰속도를 변화시켰을 때의 마찰거리 에 따른 마찰계수의 변화를 나타낸 결과로서 각 용사피막 시험편에서 마찰초기에는 마찰계수가 심하게 변화하나 마찰거리가 늘어남에 따라 마찰계수가 거의 안정화 되어 가는 것을 알 수 있다. 또한 용사피막 재료에 따라 마찰속도에 따른 마찰특성이 다르게 나타남을 알 수 있다. 즉 Al₂O₃, TiO₂, Mo 용사피막과 같이 비교적 경질 용사피막인 경우는 0.1m/sec의 마찰속도에서 낮은 마찰계수값을 나타내고, 마찰속도가 증가함에 따라 마찰계수가 상승함을 나타내고 있으며, SUS42C, Fe, Ni-Cr과 같이 비교적 연질인 용사피막은 가장 높은 마찰속도인 1.8m/sec의 마찰속도에서 낮은 마찰계수값을 나타내고 있으며, 마찰속도가 느려짐에 따라 마찰계수값이 상승함을 나타내고 있다. 또한 가장 연질의 Al-Bronze 용

사피막은 1.0m/sec의 마찰속도에서 가장 낮은 마찰계수를 나타내고, 0.1m/sec에서 가장 높은 마찰계수를 나타냄을 알 수 있다. 이상의 결과로부터 TiO₂, Mo, Al₂O₃ 용사피막과 같이 경질 용사피막은 耐마찰이 요구되는 低速度의 기계부품에 사용하는 것이 유리하고, Al-Bronze 용사피막은 耐마찰이 요구되는 中速度의 기계부품에 사용하는 것이 유리하며, SUS42C, Ni-Cr, Fe 분말 용사피막은 耐마찰이 요구되는 高速度의 기계부품에 사용하는 것이 유리함을 알 수 있다.

③ Fig. 7~Fig. 8은 건식조건 하에서 인가하중을 20.45N 일정하게 하여 마찰속도를 변화시켰을 경우의 마찰시간에 따른 마찰계수의 변화를 각 용사피막에 대해 비교한 것으로 각 마찰속도에서 용사피막의 종류를 불문하고 모든 용사피막에서 마찰초기에는 낮은 마찰계수를 보이나 20여분 후 부터는 안정된 마찰계수값으로 상승함을 보이고 있다. 또한 0.1m/sec의 마찰속도에서는 TiO₂, Mo, Al₂O₃ 용사피막이 낮은 마찰계수값을 나타내고, SUS42C, Al-Bronze, Ni-Cr, Fe 용사피막이 높은 마찰계수값을 나타내고 있다. 그리고 1.8m/sec의 마찰속도에서는 SUS42C, Ni-Cr 용사피막이 낮은 마찰계수값을 나타내고 TiO₂, Al₂O₃, Al-Bronze 용사피막이 높은 마찰계수값을 나타냄을 알 수 있다. 이상의 결과로부터 0.1m/sec와 같은 저속영역에서는 TiO₂, Mo, Al₂O₃ 용사피막의 耐마찰특성이 우수하다. 그리고 1.8m/sec와 같은 고속영역에서는 SUS42C, Fe, Ni-Cr 용사피막이 우수함을 나타내었다.

④ Fig. 9는 Disk형 시험편을 일반 엔진 윤활유에 1회침지하여 油膜을 형성한 상태에서 인가하중을 122.49N으로 하고 마찰속도를 1.8m/sec로 하여 마찰시간 동안의 마찰계수의 변화양상을 나타낸 것으로서 마찰초기에는 각 용사피막의 마찰계수값은 큰 차이를 보이지 않으나 시간이 경과함에 따라 각 분말 용사피막의 마찰계수값이 차이를 나타냄을 알 수 있다. 즉, Mo, TiO₂, Al₂O₃ 분말 용사피막은 시간이 경과함에 따라 마찰계수값이 상승하고, Ni-Cr, Fe, SUS42C, Al-Bronze 분말 용사피막은 시간이 경과함에 따라 마찰계수값이 低下하거나 유지되는 현상을 보이고 있다. 이상의 결과로부터 경한 분말 용사피막인 Mo, TiO₂, Al₂O₃ 분말 용사피막은 유막의 지속성이 열악하여 마찰계수값이 상승하나 Ni-Cr, Fe, SUS42C, Al-Bronze 분말 용사피막은 유막의 지속성이 우수하여 유막이 파괴되지 않음을 알 수 있다.

⑤ Fig. 10은 각 용사피막을 건식조건 하에서, 인가하중을 20.45N으로 일정하게 하였을 경우 마찰속도가 0.1m/sec일때와 마찰속도가 1.8m/sec일때에 5000m의 마찰거리까지 마찰시켰을 경우의 마모량을 비교한 결과로서 마찰속도가 0.1m/sec인 경우와 1.8m/sec인 경우 모두 경한 용사피막이 연한 용사피막보다는 마모량이 적다. 즉 Al-Bronze 분말 용사피막이 가장 마모량이 많고, Fe, Ni-Cr, Al₂O₃, TiO₂, Mo 분말 용사피막 順으로 마모량이 적게 나타나고 SUS42C 분말 용사피막이 마모량이 가장 적다. 여기서 특이할 사항은 SUS42C 용사피막이 경도값이 높은 Al₂O₃, TiO₂, Mo 용사피막보다도 마모량이 적은 것은 SUS42C 분말 용사피막이 Al₂O₃, TiO₂, Mo 용사피막보다 분말입자간의 결합력이 더 크기 때문에 고경도의 Al₂O₃, TiO₂, Mo 분말 용사피막보다 탈락마모가 적게 일어나기 때문이라고 사료된다.

⑥ Fig. 11은 SUS42C 용사피막이 경질 용사피막보다 입자간 결합력이 더 크기를 알기 위해 피막자체의 인장강도를 시험한 결과를 나타낸 것으로 SUS42C 용사피막이 가장 인장강도가 높고, Mo, Al₂O₃, TiO₂ 용사피막 順으로 인장강도값이 낮아짐을 알 수 있다. 이상의 결과에서 SUS42C 분말 용사피막은 마모량, 경도값, 인장강도값을 모두 비교해 보면 다른 용사피막보다도 매우 우수한 특성을 나타냄을 알 수 있다.

4. 결론

Disk형 단강재 도재 표면에 耐마찰·耐마모용으로 사용되는 금속계 용사분말과 세라믹계 용사분말을 사용하여 용사피막을 형성한 후, 상대마모재인 텅스텐 Pin을 사용하여 각 용사피막에 대해 건식과 1회 윤활유 침지조건에서의 윤활조건에서 마찰·마모 실험을 실시한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

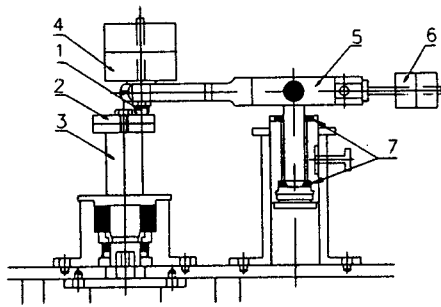
1. 각 용사피막의 비이커스경도값을 측정한 결과 Mo 용사피막의 경도값이 가장 높았으며, TiO₂, Al₂O₃, SUS42C, Ni-Cr, Fe, Al-Bronze 분말 용사피막의 順으로 경도값이 낮아졌다.
2. 건식상태에서 경질 용사피막은 낮은 마찰속도에서 낮은 마찰계수를 나타내고, 연질 용사피막은 높은 마찰속도에서 낮은 마찰계수를 나타낸다.
3. TiO₂, Al₂O₃, Mo과 같이 경질 용사피막은 0.1m/sec와 같은 低速영역에서 적합하고, SUS42C, Ni-Cr, Fe과 같이 비교적 연질 용사피막은 高速영역에서 적합하다.
4. 각 용사피막에 대한 유막의 지속성은 Mo, TiO₂, Al₂O₃의 경질 용사피막에 비해 Ni-Cr, Fe, SUS42C, Al-Bronze의 연질 용사피막이 더 우수하다.
5. 건식상태에서 마찰속도에 따른 각 분말 용사피막의 마모량은 0.1m/sec의 低速度에서나 1.8m/sec의 高速度에서 모두 SUS42C 용사피막의 마모량이 가장 적었고, Al-Bronze 용사피막의 마모량이 가장 많았다.
6. 용사피막의 인장강도는 SUS42C 용사피막이 가장 인장강도가 높고 Mo 용사피막, Al₂O₃ 용사피막, TiO₂ 용사피막 順으로 인장강도값이 낮아졌다.
7. SUS42C 용사피막을 제외하고 마모량과 경도값을 비례관계를 나타내었다.

Table 1 Spraying condition

	T valve	Flowmeter		Air pressure (kg/cm ²)	Spraying distance (mm)
		Oxy. gas pressure	Ace. gas pressure		
Mo	6~10	40	60	2.8	200~230
Fe	6~10	45	55	3.7	230
SUS42C	10~12	45	55	3.8	200
Al ₂ O ₃	5~7	40	60	2.8	100~110
Al-Bronze	10~12	42	60	4.5	180~200
Ni-Cr	10~12	40	60	2.8	230~250
TiO ₂	6~9	40	60	2.8	120~150

Table 2 Chemical Compositions of Spray Powder(wt%)

Spray Powder	Chemical Compositions							
	Fe	Cr	Ni	C				
SUS42C	Bal.	16	2	0.2				
	Al ₂ O ₃	TiO ₂	SiO ₂	FeO ₃	etc.			
Al ₂ O ₃	96	2	0.5	0.5	1			
	Al-Bronze				etc.			
Al-Bronze	Bal.				2			
	Mo				etc.			
Mo	Bal.				0.8			
	Fe		Ni		Al			
Fe	Bal.		38		10			
	TiO ₂				etc.			
TiO ₂	Bal.				1.2			
	Ni	Cr	Si	B	Cu	Mo	Fe	C
Ni-Cr	Bal.	16	4	4	3	3	2.5	0.5



- 1. Pin 2. Disk 3. Axis of Rotation
- 4. Applied Weight 5. Balance Bar
- 6. Balance Weight 7. Ball Bearing

Fig. 2. 1 Schematic Illustration of Friction and Wear Test Apparatus

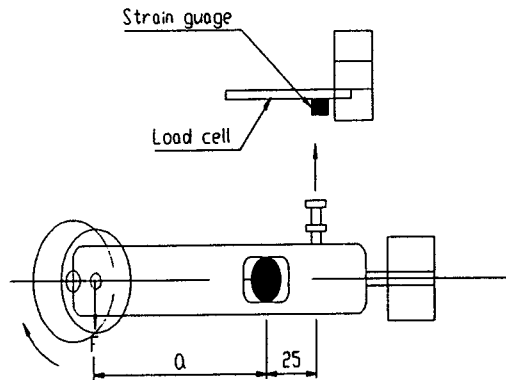


Fig. 2. 2 Schematic Illustration of Friction Force

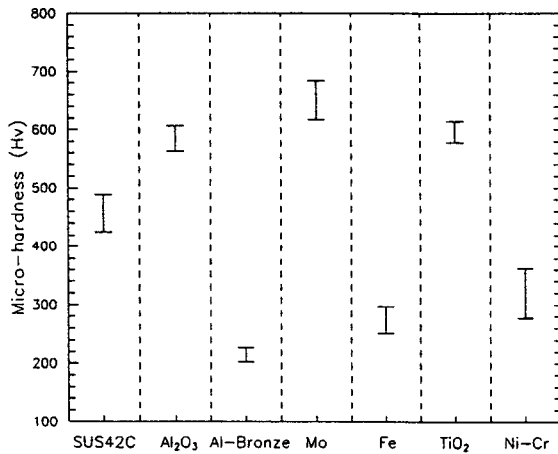


Fig. 3 Results of Micro-hardness Test of Sprayed Coating Layer

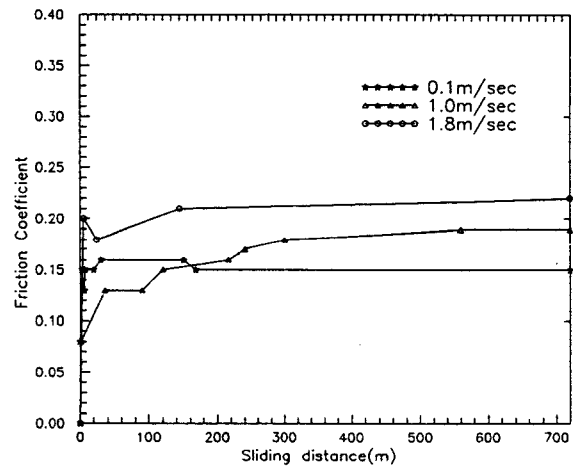


Fig. 4 The Change of Friction Coefficient on the Spraying Layer of Mo Powder along with Sliding Distance in Dry Condition

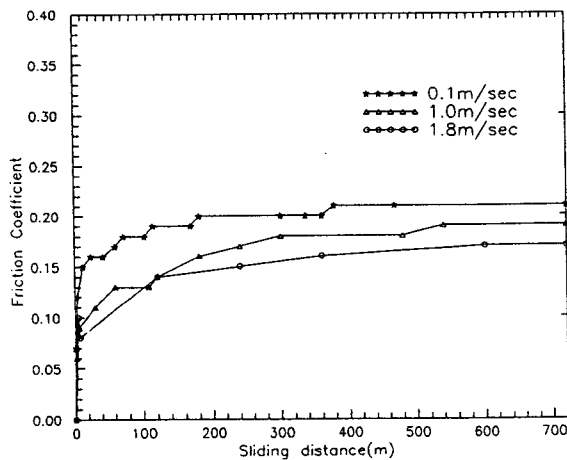


Fig. 5 The Change of Friction Coefficient on the Spraying Layer of SUS42C Powder along with Sliding Distance in Dry Condition

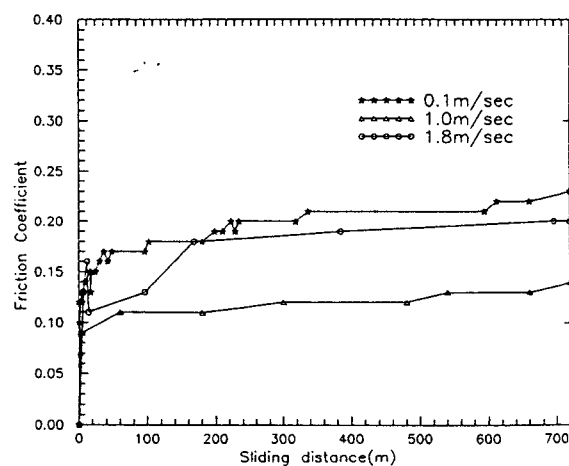


Fig. 6 The Change of Friction Coefficient on the Spraying Layer of Al-Bronze Powder along with Sliding Distance in Dry Condition

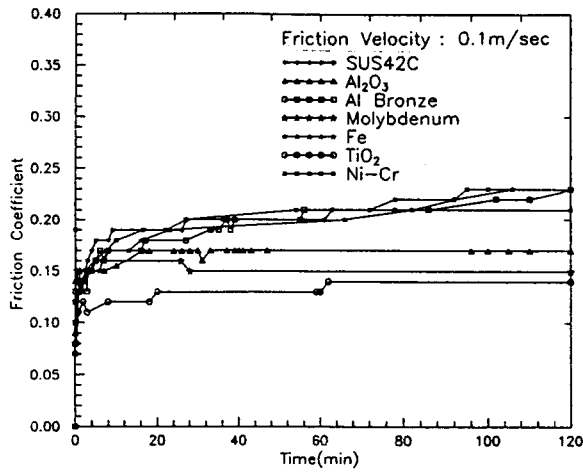


Fig. 7 The Friction Coefficient of Various Sprayed Specimens along with Friction Times in Dry Condition

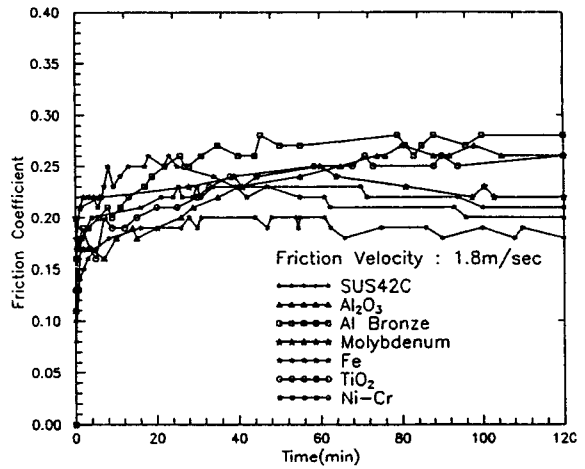


Fig. 8 The Friction Coefficient of Various Sprayed Specimens along with Friction Times in Dry Condition

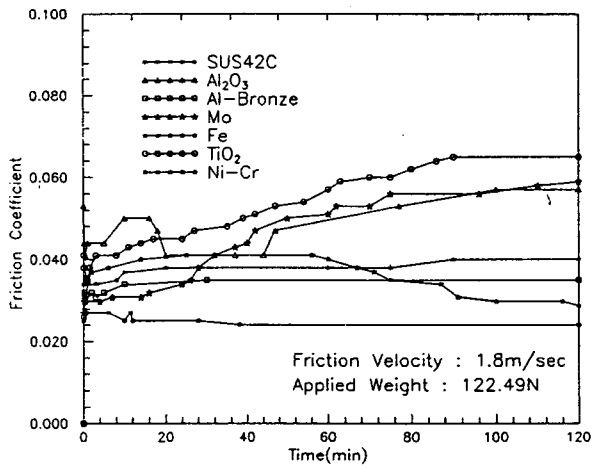


Fig. 9 The Friction Coefficient of Various Sprayed Specimens along with Friction Times in Lubrication Condition

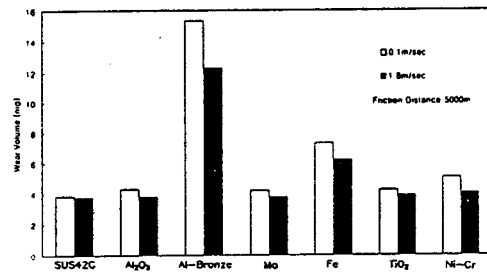


Fig. 10 The Comparison of Wear Volume with Sprayed Coating Layer in Dry Condition

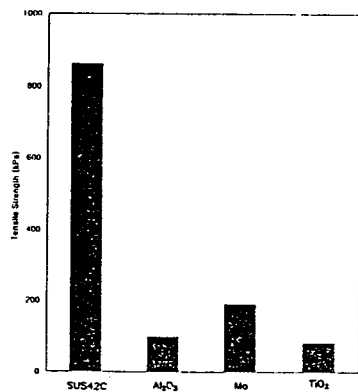


Fig. 11 Result of the Tensile Test of Sprayed Coating Layer