

溶射皮膜의 摩擦·摩耗 特性 評價에 關한 研究

강 태 영¹⁾, 김 영 식²⁾

A Study on the Evaluation of the Friction and Wear Properties of the Sprayed Coating Layer

Tae Young Kang , Young Sik Kim

ABSTRACT

In this study, friction and wear properties of flame sprayed specimens and hard Cr plating specimens were tested, and their properties were compared each other in dry and lubrication condition. Ni-Cr powder and steel powder were used as the spray powder and sprayed on the steel(S45C) substrate by flame sprayed method. Each wear surface was observed with SEM after friction and wear test.

1. 서론

마모손상이 예상되는 가혹한 사용조건하에서도 기계장치의 본래 성능이 유지되기 위해서는 기계 부품의 높은 내구성과 신뢰성이 요구된다. 기계부품의 내마모 특성을 향상시키기 위한 표면처리 방법으로 열처리, 확산접합, 화학증착(CVD : Chemical Vapor Deposition)법, 물리증착(PVD : Physical Vapor Deposition)법, 도금법, 용사법등이 있다.

그 중에서 용사법은 저융점의 플라스틱에서 부터 고융점의 세라믹스에 이르는 광범위한 재료의 용융상태 입자를 고속으로 모재에 충돌시켜 피막을 형성하는 특

1) 한국해양대학교 재료공학과 석사과정 용접공학 전공

2) 한국해양대학교 재료공학과 교수

장이 있다.

산소-아세틸렌 화염을 열원으로 사용하는 플레임(Flame)용사는 조작이 간단하고 설비비나 운전경비가 저렴할 뿐만아니라 사용재료도 금속, 각종 기능성 합금 및 세라믹스에 이르기까지 다양하다.

한편, 선박엔진의 피스톤 로드(Piston rod)와 스테핑 박스(Stuffing box)내의 구리 링(Copper ring)사이에는 경계마찰 또는 건식마찰상태가 지속되는 경우로, 매우 가혹한 마찰운동이 일어나는 부분이라고 할 수 있다. 그래서 작동중 마찰·마모 현상이 현저하여 피스톤 로드는 편마모된다. 그렇게 되면 피스톤 로드와 스테핑 박스내의 구리링 간격이 맞지 않아서, 연소실에서 새어 나온 찌꺼기가 크랭크 챔버(Crank chamber) 안으로 들어가는 경우가 있다. 이로 인해 기관에 여러가지 문제점이 생기기 때문에 일정기간 마다 피스톤 로드를 오버 haul(Over haul)하여 마모 부위를 제척하고 일정마모량 이상 마모되면 습동부 부품전체를 교체하거나 편마모된 부위를 기계 가공하여 재사용하고 있다.

따라서 피스톤 로드를 표면처리해 내마모성을 향상시켜 사용수명을 연장시키면 교체나 보수에 따른 비용을 절감할 수 있다.

선박엔진 부품의 표면처리 방법으로서 가장 널리 사용되고 있는 방법은 경질 Cr 도금 방법으로, 특히 피스톤 링이나 실린더 라이너 표면에 마모 저항이 높은 경질 Cr 도금 방법이 널리 이용되고 있다.^{(1)~(3)}

그러나 피스톤 로드에 대해 경질 Cr 도금을 실시하게 되면, 경질의 마모 입자가 피스톤 로드와 구리링 사이에 끼이게 되어 마모를 더욱 촉진하는 결과를 가져올 수 있기 때문에 신중을 기하지 않으면 안된다.^{(1),(3),(4)}

그에 비해 용사법에 의한 표면처리는 공정이 단순하고 설비·재료면에서 경제적이며 도금 폐액으로 인한 환경문제가 발생되지 않기 때문에 선박기관의 피스톤 로드의 경우 그 제작 공정이나 재생 보수 공정에 있어서 마찰·마모부위에 내마모성을 부여하는 처리로서 매우 양호한 방법이라고 할수있다.

본 연구에서는, 이와 같은 점을 고려하여 피스톤 로드와 같이 연속적으로 윤활이 되지 않는 마찰·마모 부위에 용사법을 적용하여 용사표면의 마찰·마모 특성을 평가함으로써 피스톤 로드의 제작공정 또는 재생 보수 공정에 용사법의 적용을 확립하고자 한다.

2. 실험장치 및 실험방법

피스톤 로드와 스테어링 박스의 구리링과 왕복운동하는 것을 재현하여 만능재료 시험기를 이용하여 왕복마찰 시험장치를 제작하였다. Fig. 2.1은 마찰축과 링재의 조합 및 하중 부하방법의 개요도를 보인 것이다. 본 실험에서는 실험조건을 더욱 가혹하게 하기위해 상대 재질인 링은 鋼(S45C鍛鋼材)으로 제작하였다.

본 실험의 마찰·마모에 쓰인 피스톤로드의 모재는 鍛鋼材이며 이표면을 Cr 도금, Ni-Cr 분말 용사, 鋼 분말 용사, 표면 처리되지 않은 강 4종류로 하였다. Table 2.1은 모재와 상대 마모재인 鍛鋼材 링의 화학조성을 나타낸것이다.

모든 시험편의 최종치수는 Fig. 2.2처럼 하였으며 표면 거칠기는 약 $R_{max}=4\mu m$, $R_a 0.4\mu m$ 가 되도록 연마하였다.

시험편은 표면처리 후 Fig. 2.2과 같은 치수로 기계가공후 연마하였다.

Cr 도금 시험편의 도금은 Table 2.2와 같은 도금 조건으로 하였다.

용사시험편의 용사피막은 Ni-Cr 분말, (Bond coating은 Ni-분말), 鋼 분말의 두 가지 분말로 두 종류의 시험편을 제작하였다.

Table 2.1 Chemical compositions of substrate and steel ring (wt%) Table 2.2 Cr plating Condition

Fe	Mn	Si	C	P	S	Parameter	Condition
Bal.	1.01	0.23	0.14	0.019	0.004	Cr content	250gr/l
						H ₂ SO ₄	2.5gr/l
						Electrolytic specific Gravity	19~20/50~55℃
						Plating temperature	50~60℃
						Current density	20A/dmm ²
						Electrolytic Liquid PH	Strong acid (2~3)

용사 분말의 화학조성은 Table 2.3, Table 2.4에 각각 나타내었다. 플래임 용사 장치로는 Eutectic사제의 Terodyn System 2000을 사용하였다.

Table 2.5는 Ni-Cr 분말 용사 시험편 제작시 용사 조건을 나타낸 것이다. 또한 Table 2.6은 鋼 분말 용사 시험편 제작시의 용사조건을 나타낸 것이다.

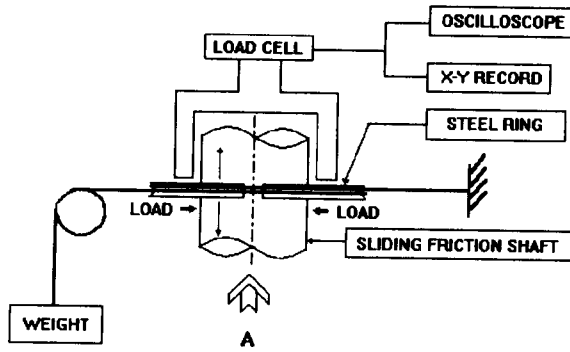


Fig.2.1 Schematic illustration of friction and wear test

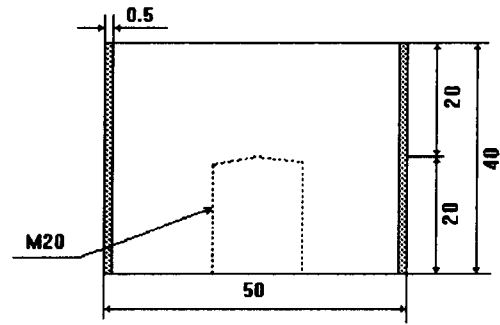


Fig. 2.2 Dimension of friction and wear specimen

Table 2.3 Cr-Ni spray powder of chemical compositions (wt.%)

Ni	Cr	Si	B	Cu	Mo	Fe	C
Bal.	16	4	4	3	3	2.5	0.5

Table 2.4 Steel spray powder of chemical compositions (wt.%)

Fe	Al	Mo	C
Bal.	10	1	0.2

Table 2.5 Spraying condition of Ni-Cr Powder

Parameter	Condition
Oxy. gas pressure	40 SCFH
Ace. gas pressure	60 SCFH
Spraying distance	230 mm
T valve	12
Rotation frequency of work piece	120 r.p.m.
Distance of torch feed	6 mm/r.p.m.
Preheating temperature	90~100°C

Table 2.6 Spraying condition of Steel Powder

Parameter	Condition
Oxy. gas pressure	30 SCFH
Ace. gas pressure	40 SCFH
Spraying distance	230 mm
T valve	10
Rotation frequency of work piece	120 r.p.m.
Distance of torch feed	6 mm/r.p.m.
Preheating temperature	90~100°C

여기서 마찰계수(μ)는 운동 마찰시의 하중을 오실로스코프상에서 읽어서 운동 마찰력을 부하하중으로 나누어 구하였다.⁽⁴⁾ 부하하중은 前述 한 바퀴 감게 한 쪽 끝이 고정된 강선으로 마찰축을 둘러싸고 있는 링재를 한번 감은 후 추의自重에 의해 작용하도록 하였다. 따라서 실제 하중은 추의 무게를 W라 하면 반 바퀴 감을 경우는 Fig. 2.3의 (a)와 같이 2W로 되고 한 바퀴 감게 되면 (b)와 같이 되어 4W가 되므로, 본 실험에서는 부하하중을 4W로 계산하였다. 따라서

$$\mu = \frac{F}{4W}$$

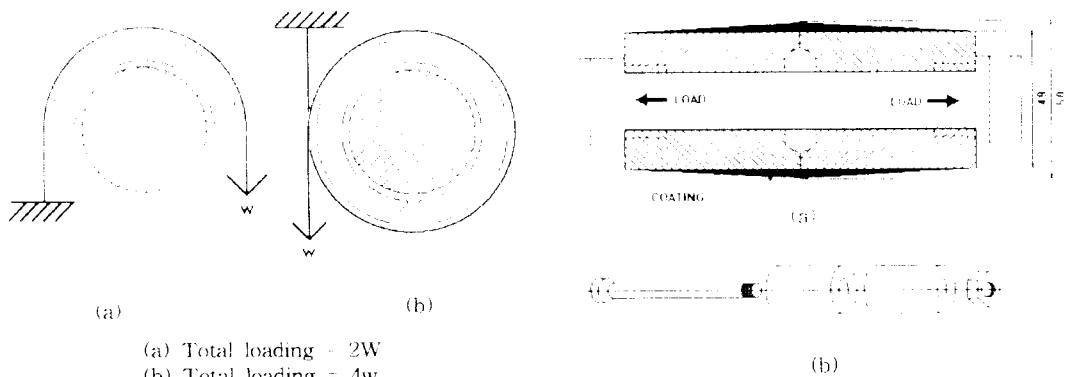
μ : Coefficient of friction
 F : Friction force
 W : Weight

마찰시험시 부하하중은 392N과 588N으로 하였으며 실험환경은 건식상태(Dry condition)와 일반엔진 윤활유에 시험편을 1회침지한 상태로 하여 각 시험편에 대해서 4가지 조건으로 실험을 행하였다.

마찰거리는 8mm로 하였고 1.5cycle/sec의 속도로 400,000 cycle가 될때 까지로 하여 총 마찰거리를 6400m로 마찰·마모실험을 행하였다. 마모량은 마이크로 미터로 마모된 부위의 직경을 측정하여 부피로 계산하였다.

마모 시험후, 주사식 전자현미경으로 마모면을 관찰하였다. 피막의 경도는 마이크로 비이커스경도시험기(Shimadzu사제의 HMV-2000)를 사용하여 압자하중 500gf 부하시간 10sec로 하여 피막단면부에서 피막의 경도를 측정하였다.

Fig. 2.4는 용사 피막의 인장 강도 시험을 위해 만들어진 시험편의 개요도를 보인것이다. Fig. 2.4의 (b)처럼 강봉을 두개 제작하여 두개의 강봉을 볼트와 너트로 체결한 다음 표면을 기계가공후 그위에 용사하여 Fig. 2.5의 (a)처럼 인장 실험을 행하였다.



(a) Total loading = 2W
 (b) Total loading = 4w
 Fig. 2.3 View of loading on friction surface by the weight

Fig. 2.4 Schematic illustration of tensile strength specimen of the coating layer

3. 실험결과 및 고찰

3.1 표면 처리면의 경도 특성

Fig. 3.1은 표면처리를 실시 하지 않은 鍛鋼材 그대로의 표면, 경질 Cr 도금 처리 표면, Ni-Cr 분말 용사 처리 표면, 鋼 분말 용사 처리 표면에 대해 미소경도를 시험한 결과를 나타낸 것이다.

이 결과에 의하면 경질 Cr 도금 표면 경도가 가장 높고 그 다음이 Ni-Cr 용사 처리 표면, 鋼 용사 처리 표면, 표면 처리를 실시하지 않은 鍛鋼材표면 順으로 경도가 낮아짐을 보이고 있다. 특히 경질 Cr 도금 표면은 Hv값이 1000정도에 육박하고 있어 대단히 취약한 표면임을 보이고 있으며 鋼 분말 용사 처리표면은 표면 처리를 실시하지 않은 鍛鋼材표면의 경도와 거의 비슷한 경도값을 보이고 있어, 연성이 풍부한 표면임을 알 수 있다.

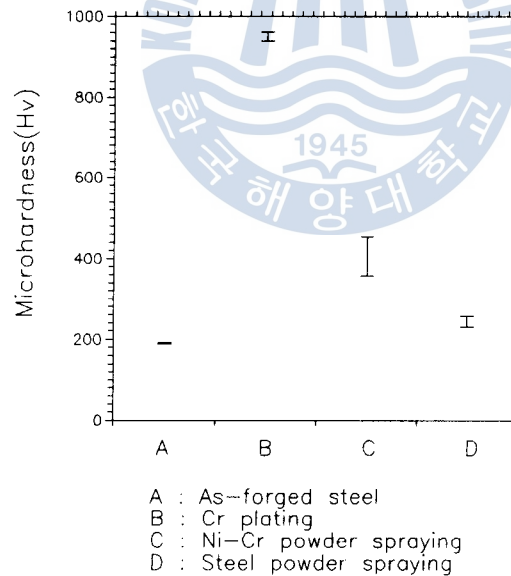


Fig. 3.1 Result of micro-hardness test of coating layer

3.2 마찰 거리에 따른 마찰 계수의 특성변화

Fig. 3.2과 Fig. 3.3은 鍛鋼材 그대로인 표면, 경질 Cr 도금 표면, Ni-Cr 분말 용

사 처리 표면, 鋼 분말 용사 처리 표면에 대해 건식 조건에서 부하 하중(W)은 392N과 588N에서 6400m의 거리 만큼 마찰시켰을때, 마찰 거리의 변화에 따른 마찰 계수의 변화를 나타낸 그림이다. 이 결과에 의하면 각 시험편에서 다 같이 마찰 초기에 마찰계수의 급격한 상승 현상을 보이다가 안정된 상태로 변화함을 보이고 있다. 표면 처리되지 않은 강 의 경우 동종 재료의 마찰계수 특성상 마찰 계수가 급격하게 상승함을 알 수있다. 또한 여러가지 표면 처리법중, 경질 Cr 도금한 시험편에서 가장 높은 마찰계수를 나타내며, 鋼 용사 시험편에서 가장 낮은 마찰계수값을 나타내고 있다.

Fig. 3.4와 Fig. 3.5은 준비된 시험편을 일반 엔진 윤활유에 1회침지하여 표면에 油膜을 형성한 상태에서 마찰 시험장치에 장착을 하여 하중 부하후 마찰시켜 마찰거리에 따른 마찰계수의 변화 양상을 시험한 결과이다.

이 결과에 의하면 마찰초기에는 각 시험편에서 큰 차이를 보이지 않으나 마찰 거리가 증가함에 따라서 각 시험편에 대해 현격한 차이를 나타내고 있음을 보이고 있다. 즉 표면 처리를 실시하지 않은 鍛鋼材표면 그대로인 경우가 가장 현격한 마찰 계수의 상승 현상을 보이며⁽⁶⁾, 그 다음이 경질 Cr 도금 시험편, Ni-Cr 분말 용사 시험편, 鋼 분말 용사 시험편 順으로 마찰 계수가 낮아지는 현상을 보이고 있다.

부하 하중(W)이 392N, 습식조건에서 마찰 시험을 행한 그림인 Fig. 3.4에서 경질 Cr도금 시험편의 경우 마찰 계수가 서서히 올라가고 있지만 용사 시험편의 마찰 계수는 거의 변화가 없다. 부하 하중(W)이 588N, 습식조건에서 마찰 시험을 행한 Fig. 3.5의 경우 경질 Cr도금 시험편은 마찰 계수가 3000m 이후로는 건식상태의 마찰 계수를 보이지만 용사 시험편의 마찰 계수는 거의 변화가 없다.

이상의 결과로부터 鍛鋼材표면 그대로인 상태나 경질 Cr 도금한 표면에서는 油膜의 지속성이 나빠서 마찰계수의 급격한 상승을 일으키나 용사법에 의해 표면처리된 시험편은 油膜의 지속성이 우수하여 유막이 파괴되지 않아서 마찰계수가 상승되지 않는 것으로 판단된다. 이와 같이 용사 시험편의 경우 마찰 계수가 상승하지 않는 것은 용사표면에 미세하게 형성된 많은 기공들 속으로 윤활유가 스며들어가, 이에 의해 油膜이 지속적으로 형성되기 때문인 것으로 사료된다.

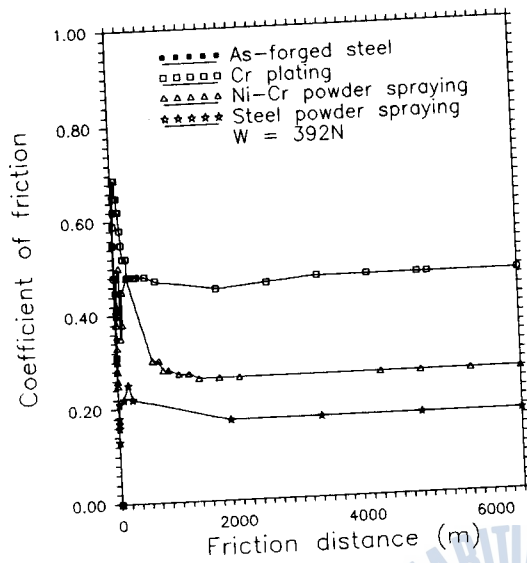


Fig. 3.2 Relation between friction distance and coefficient of friction with coating material in dry condition

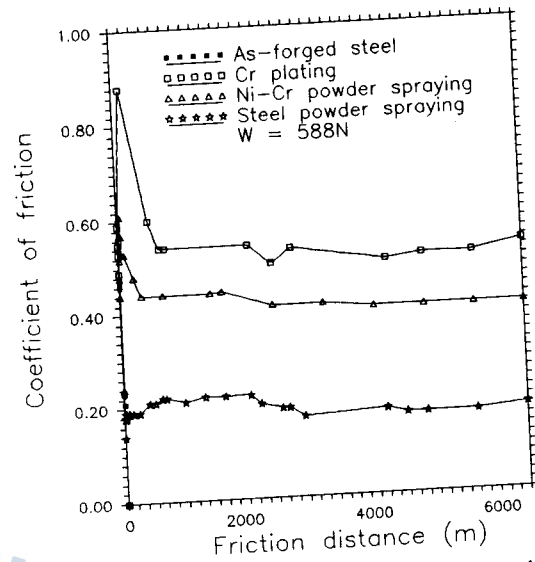


Fig. 3.3 Relation between friction distance and coefficient of friction with coating material in dry condition

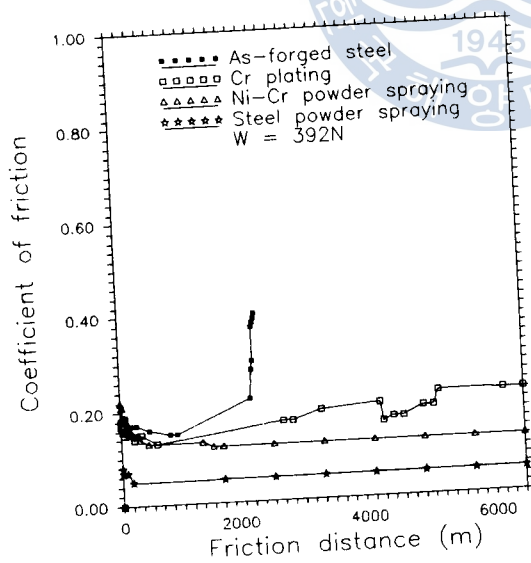


Fig. 3.4 Relation between friction distance and coefficient of friction with coating material in lubrication condition

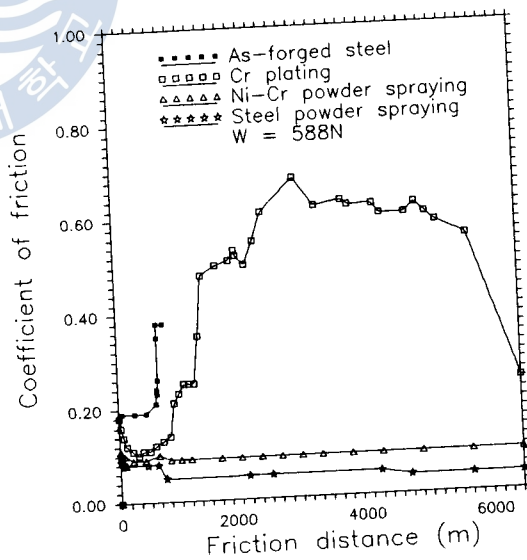


Fig. 3.5 Relation between friction distance and coefficient of friction with coating material in lubrication condition

3.3 각 시험편의 마모량의 비교

Fig. 3.6과 Fig. 3.7는 鍛鋼材 그대로인 표면, 경질 Cr 도금 표면, Ni-Cr 분말 용사 처리 표면, 鋼 분말 용사 처리 표면에 대해 건식 조건에서 부하 하중이 392N 일때와 588N일때에 6400m의 거리 만큼 마찰시켰을때 마모량을 비교한 결과이다. 이 결과에 의하면 건식 조건에서는 鍛鋼材표면 그대로인 상태에서는 현저한 마모 현상을 보이거나, 표면 처리를 실시함으로써 마모량을 현격히 감소 시킬 수 있음을 보이고 있다. 또한 표면처리법 중에서는 경질 Cr 도금처리시 가장 낮은 마모량을 나타내고 있음을 보이고 있다.

Fig. 3.8와 Fig. 3.9는 각 시험편을 윤활유에 1회 침지한후 Fig. 3.6과 Fig. 3.7의 시험조건과 같은 조건으로 시험하여 각 시험편의 마모량을 비교한 결과이다. 이 경우에도 鍛鋼材표면 그대로인 상태에서 가장 현격한 마모가 일어나며, 경질 Cr 도금한 표면, Ni-Cr 분말 용사를 실시한 표면, 鋼 분말 용사를 실시한 표면 順으로 마모량은 현격히 줄어 들고 있는 현상을 보이고 있다.

Fig. 3.6 ~ Fig. 3.9의 圖面에서 특기할 사항은 건식 조건에서는 경질 Cr 도금 시험편이 가장 낮은 마모량을 보이거나, 1회 윤활유에 침지한 후 시험한 조건에서는 鋼 분말을 이용한 용사 시험편의 경우가 가장 낮은 마모량을 보인다는 사실이다. 이러한 현상은 건식과 윤활 조건에서의 마찰 기구의 변화 현상에 기인하는 것으로 사료된다. 즉 건식 상태에서는 Cr 도금 표면의 경도가 가장 높아 이러한 高경도 현상이 마찰 현상에 관여하지만, 윤활유에 1회침지후 마모량을 시험한 경우에는 경질 Cr 도금표면은 油膜의 지속성이 나빠 건식 상태로 쉽게 전환되어 표면에서의 탈락 마모현상이 발생하나 금속 분말을 이용한 용사시험편에서는 油膜이 長기간 지속되어 마모 방지에 기여하기 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 3.6 ~ Fig. 3.9에서 Ni-Cr 분말 용사 시험편과 鋼 분말 용사 시험편의 마모량을 비교하면 鋼 분말 용사 시험편에서 마모저항이 더 우수하다.

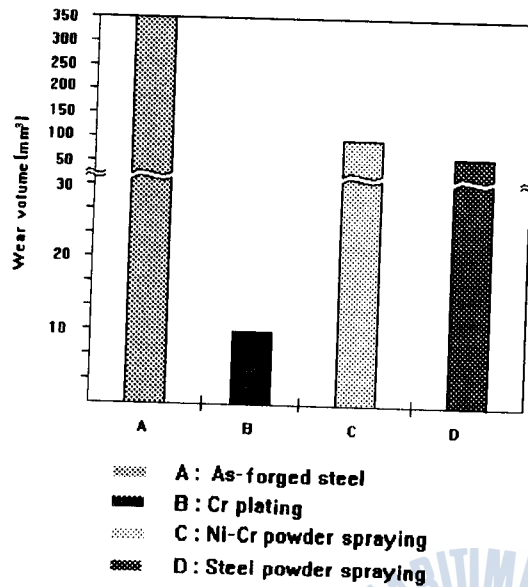


Fig. 3.6 The comparison of wear volume with surface coating material in dry condition (W = 392)

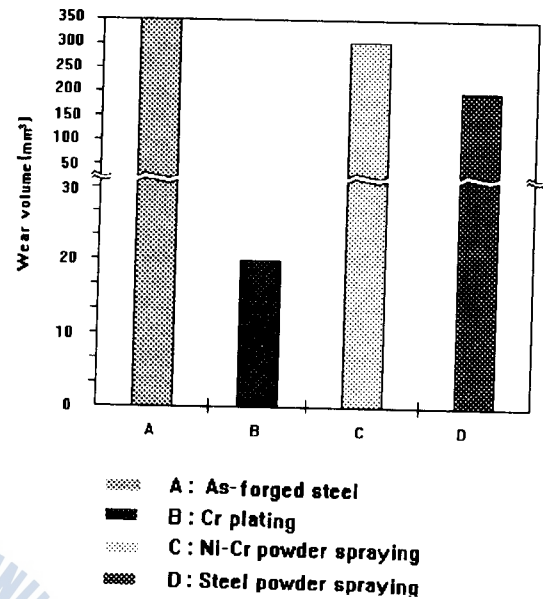


Fig. 3.7 The comparison of wear volume with surface coating material in dry condition (W = 588N)

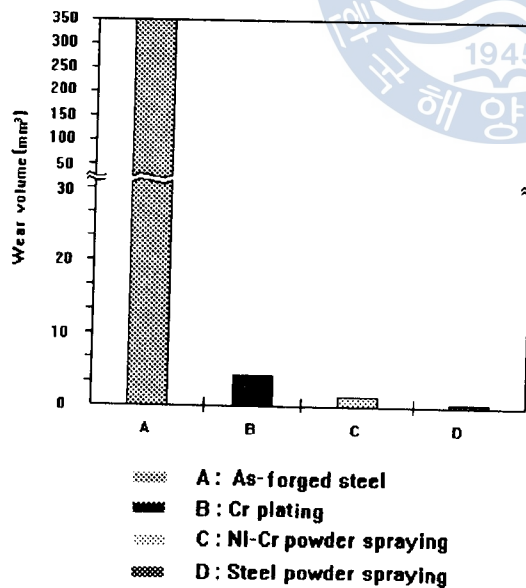


Fig. 3.8 The comparison of wear volume with surface coating material in lubrication condition (W = 392N)

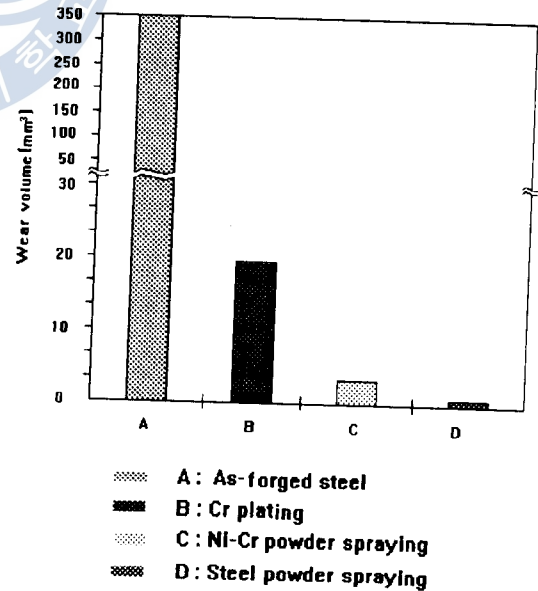
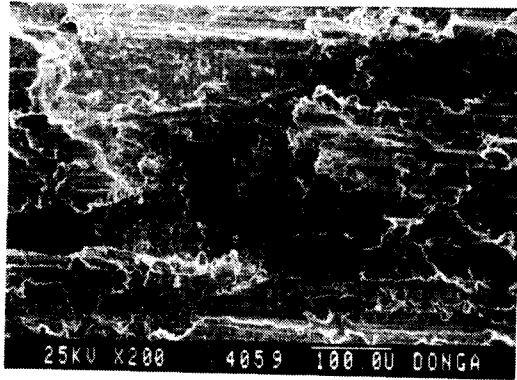


Fig. 3.9 The comparison wear of volume with surface coating material in lubrication condition (W = 588N)

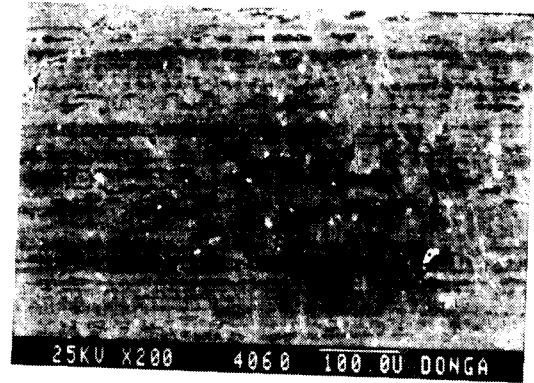
3.4 마모면의 조직적 특성

Photo. 3.1은 부하 하중이 588N의 건식조건에서 마찰실험을 행한후 마모된 표면의 SEM사진이다. 여기서 (a)는 표면 처리되지 않은 鍛鋼材의 마모면을 (b)는 경질 Cr 도금 처리면의 마모면, (c)는 Ni-Cr 분말 용사처리 표면의 마모면, (d)는 鋼 분말 용사처리면의 마모면을 각각 나타낸 것이다. 이 결과에 의하면, (a)의 표면처리 되지 않은 표면의 마모면과 (d)의 鋼 분말 용사처리 표면의 마모면의 양상은 다같이 소성변형 시어립(Shear lip)을 다수 보이고 있어 용착 마모기구에 의해 마모가 진행 된 것을 알 수 있다. 그에 비해 경질 Cr 도금처리면의 마모면에는 다수의 균열 狀이 보이고 있어 어느 한계 마찰 거리에 이르면 일시에 표면층이 떨어져 나갈 가능성을 지니고 있음을 알 수 있다.⁽⁷⁾ 또한 Ni-Cr 분말 용사면의 마모면에는 용사입자가 탈락한 흔적이 다수 보이고 있어 입자의 탈락 현상에 의해 마모가 진행되고 있음을 알 수 있다.⁽⁸⁾

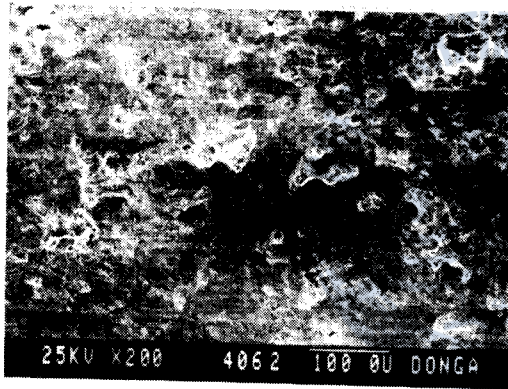
이상의 결과에서 특기 할것은 Ni-Cr 분말 용사 처리면에서 마모기구가 달라진다는 사실이다. 즉 Ni-Cr 분말 용사처리면은 입자 탈락에 의해 마모가 진행되나, 鋼 분말 용사처리면에서는 용착 현상에 의해 마모가 진행되고 있어 표면 경도는 Fig. 3.1에서 Ni-Cr 분말 용사처리면의 경우가 鋼 분말 용사처리면에 비해 더 높은 데도 불구하고 Ni-Cr 분말 용사처리면의 마모가 더 빨리 진행되는 것으로 판단 된다.



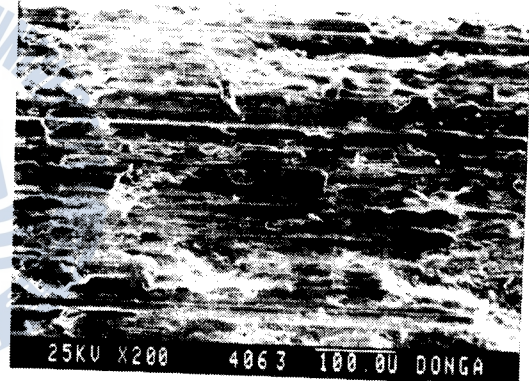
(a)



(b)



(c)



(d)

(a) Worn surface of as-forged steel

(b) Worn surface of hard Cr plating specimen

(c) Worn surface of Ni-Cr powder spraying specimen

(d) Worn surface of Steel powder spraying specimen

Photo. 1 SEM photographs of worn surface in dry condition
at $W = 588N$

3.5 용사 피막의 인장 강도 특성

Fig 3.10은 Ni-Cr 분말용사 시험편과 강 분말용사 시험편의 피막자체의 인장강도 시험 결과를 나타낸 그림이다. Ni-Cr 분말용사 시험편의 경우 피막의 경도는 강 분말 용사 시험편 보다 높지만 피막의 인장강도는 강 분말 용사 시험편보다 낮다. 즉 용사피막의 입자간의 접착력은 Ni-Cr 분말 용사 시험편보다 강 분말 용사 시험편이 더 우수하다. 그래서 용사 피막의 마찰·마모시 마모량은 강 분말 용사 시험편의 경우가 더 작게 나타난 것으로 판단된다. 이와 같이 Ni-Cr 분말 용사처리면의 피막강도가 강 분말 용사처리면에 비해 더 낮은 것은 Ni-Cr 분말의 높은 용융온도로 인해 화염용사시 충분히 용융되지 않는 상태에서 소지 재료에 부착하여 피막을 형성하기 때문인 것으로 생각된다.

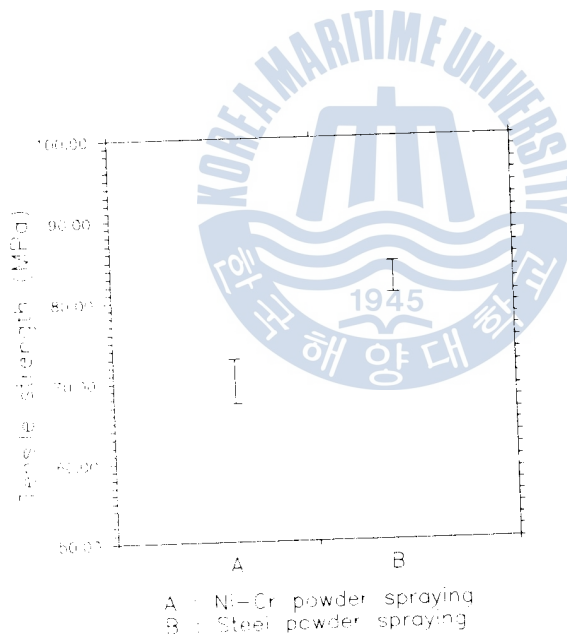


Fig 3.10 Result of the tensile test of coating layer

4. 결론

피스톤 로드材인 鍛鋼材 表面에 경질 Cr 도금처리, Ni-Cr 분말 용사처리, 鋼 분말 용사처리 및 鍛鋼材 그대로의 表面에 대해, 전식과 1회의 윤활유 침지 조건에서 상대 재료로서 鋼과의 마찰·마모 시험을 실시하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 마찰 계수는 단강재 表面 그대로인 상태가 가장 크고 경질 Cr 도금처리, Ni-Cr 분말 용사처리, 鋼 분말 용사 처리 順으로 작아진다.
2. 전식 상태에서의 마모량은 단강재 表面 그대로인 상태에서 가장 크고, Ni-Cr 분말 용사 表面, 鋼 분말 용사 表面, 경질 Cr 도금처리 表面이 가장 작게 나타났다.
3. 1회의 윤활유 침지 상태에서의 마모량은 단강재 表面 그대로인 상태에서 가장 크고, 경질 Cr 도금 表面, Ni-Cr 분말 용사 表面, 鋼 분말 용사 表面의 順으로 작아져서 鋼 분말 용사 表面의 마모량이 가장 작게 나타났다.
4. 油膜의 지속성은 단강재 表面이나 경질 Cr 도금 表面에 비해서 용사 처리표면이 매우 양호하게 된다.
5. 경질 Cr 도금 表面의 경우 도금할 때에 생긴 크랙을 중심으로 연삭마모에 의한 도금층의 탈락 현상을 볼 수 있다. Ni-Cr 분말 용사표면은 마모시 용사입자의 탈락에 의해 마모가 진행되나 鋼 분말 용사표면은 용착마모에 의해 진행되기 때문에 경도가 높은 Ni-Cr 분말 용사 表面의 마모량에 비해 경도가 낮은 鋼 분말 용사 表面의 마모량이 현격히 감소한다.
6. 용사층의 인장강도를 비교하면 鋼 분말 용사 시험편의 인장강도가 Ni-Cr 분말 용사 시험편의 인장강도보다 높음을 알 수 있다.

5. 참고문헌

- 1) W.H. Charlesworth and W.L. Brown : Soc. Auto Engrs., Auto. Eng. Congress, Detroit, 1967, 670042
- 2) N.C. Tait, SAE Australasia, 1980, 40, 2, 63.
- 3) M. J. Neale and T. S. Eyre, Tribology and the Automobile, I. Mech. E. Conference, 1982, 55.
- 4) V. Gologan and T. S. Eyre, Wear, 1974, 28, 49.
- 5) 長岡金吾 : 機械材料科學, 工學圖書株式會社, p.115~122
- 6) DONALD H.BUCKLEY : SURFACE EFFECTS IN ADHESION, FRICTION, WEAR, AND LUBRICATION pp.315~427
- 7) Stafford, Datta and Googan : Coatings and Surface Treatment for Corrosion and Wear Resistance, p.28~45
- 8) 古久保 克己, 沖 幸 男外 : セラミックス溶射皮膜の摩耗と組織の關係, 溶射學會誌, Vol. 29, No. 3



