

## 용사피막의 마찰·마모 특성평가에 관한 연구

(A Study on the Evaluation of the Friction and Wear Property of the Sprayed Coating Layer)

김 영식 : 한국 해양대학교  
김 율해 : 한국 해양대학교  
김 중호 : 한국 선급  
최 영국 : 종합 폴스타  
\* 강 태영 : 한국 해양대학교 대학원

### 1. 서언

마모손상이 예상되는 가혹한 사용조건하에서도 장치효율이 유지되기 위해서는 기계 부품의 높은 내구성과 신뢰성이 요구된다.

용사법은 저융점의 플라스틱에서부터 고융점의 세라믹스에 이르기까지 광범위한 재료의 용융상태입자를 고속으로 모재에 충돌시켜 피막을 형성하는 기술이다.

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

한편, 선박엔진의 피스톤로드(Piston rod)와 스테핑박스(Stuffing box)내의 구리 링(Copper ring)사이에는 경계마찰 또는 건식마찰로서 계속적으로 윤활유가 공급되는 상태는 아니다. 그래서 작동중 마찰·마모 현상이 현저하여 이로 인해 기관에 여러가지 문제점이 생기기 때문에 일정기간 마다 기관을 오버홀(Over haul)하여 마모 부위를 계측하고 일정마모량 이상 마도되면 습동부 부품전체를 교체하거나 편마모된 부위를 기계 가공하여 재사용하고 있다.

피스톤 로드가 소형인 경우에는 Cr 도금을 실시하여 마찰부분의 내마모성을 향상시키는 경우도 있으나 거대한 피스톤 로드에 대해 Cr 도금을 실시하는 경우 거대한 설비가 필요하고 Cr 폐액으로 인한 환경오염문제가 발생해 문제시되고 있다.

본 연구에서는 이와 같은 점을 고려하여 피스톤 로드와 같이 연속윤활이 되지 않는 마찰·마모 부위에 용사법을 적용하여 용사표면의 마찰·마모 특성을 평가함으로써 피스톤 로드의 제작과정 또는 보수 재생공정에 용사법의 적용을 연구하고자 한다.

### 2. 실험장치 및 실험방법

피스톤 로드와 스테핑 박스의 구리링과 왕복운동하는 것을 재현하여 만능재료 시험기를 이용하여 왕복마찰 시험장치를 제작하였다. Fig. 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 용사 분말, 鋼 분말 용사, 표면 처리되지 않은 강 4종류로 하였다.

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

용사 분말의 화학조성은 Table 1과 Table 2에 각각 나타내었다. 플레임 용사 장치로는 Eutectic사제의 Terodyn System 2000을 사용하였다.

Table 3은 Ni-Cr 분말 용사 시험편 제작시 본 용사 조건을 나타낸 것이다. 또한 Table 4는 鋼 분말 용사 시험편 제작시의 용사조건을 나타낸 것이다.

마찰시험시 부하하중은 900KPa으로 하였으며 실험환경은 건식상태(Dry condition)와 일반엔진 윤활유에 시험편을 1회침지한 상태로 하여 각 시험편에 대해서 2가지 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.

각 피막의 경도를 측정하고 마모 시험후, 주사식 전자현미경으로 마모면을 관찰하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

Fig. 2는 각종 시험편 피막의 미소경도를 측정한 결과를 나타낸 것이다.

Cr 도금 표면은 Hv값이 1000 정도에 육박하고 있어 대단히 취약한 표면임을 보이고 있으며 鋼 분말 용사 처리표면은 표면 처리를 실시하지 않은 鍛鋼材표면의 경도와 거의 비슷한 정도값을 보이고 있어, 연성이 풍부한 표면임을 알 수 있다.

Fig.3은 각종 표면 처리법에 의해 준비된 시험편에 대해 乾式조건에서 마찰거리에 따른 마찰계수의 변화 양상을 보인것이다. 이 결과에 의하면 각 시험편 다 같이 마찰 초기에 마찰계수의 급격한 상승 현상을 보이다가 안정된 상태로 변화함을 보이고 있다. 또한 여러가지 표면 처리법중 표면처리를 실시하지 않은 표면은 급격한 마찰 계수의 상승현상이 지속되며, Cr 도금한 시험편, Ni-Cr 분말 용사 시험편 順으로 마찰계수값이 낮아지고, 鋼 용사 시험편에서 가장 낮은 마찰계수값을 나타내고 있다.

Fig.4는 준비된 시험편을 일반 엔진 윤활유에 1회침지하여 표면에 油膜을 형성한 상태에서 마찰 시험장치에 장착하여 하중 부하후 마찰시켜 마찰거리에 따른 마찰계수의 변화 양상을 시험한 결과이다. 이 결과에 의하면 건식과 마찬가지로, 표면처리를 하지 않는 표면, Cr 도금처리 표면, Ni-Cr 용사 표면, 鋼 용사 표면, 順으로 마찰 계수 값이 낮아지고 있다.

이상의 결과로 부터 鍛鋼材표면 그대로인 상태나 Cr 도금한 표면에서는 油膜이 쉽게 파괴되어 마찰계수의 급격한 상승을 일으키나 용사법에 의해 표면처리된 시험편은 油膜이 쉽게 파괴되지 않고, 油膜의 持續性이 良好하여 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.5는 面壓이 900KPa일때에 6400m의 거리 만큼 건식 조건에서 마찰시켰을 때 마모량을 비교한 결과이다. 이결과에 의하면 건식 조건에서는 鍛鋼材표면 그대로인 상태에서는 현저한 마모 현상을 보이거나, 표면 처리를 실시함으로써 마모량을 현격히 감소 시킬수 있음을 보이고 있다. 또한 표면처리법 중에서는 Cr 도금처리 표면에서 가장 낮은 마모량을 나타내고 있음을 보이고 있다.

Fig.6은 각 시험편을 윤활유에 1회 침지한후 Fig. 5의 시험조건과 같은 조건으로 시험하여 각 시험편의 마모량을 비교한 결과이다. 이 경우에도 鍛鋼材표면 그대로인 상태에서 가장 현격한 마모가 일어나며, 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. 5, Fig. 6의 圖面에서 특기할 사항은 건식 조건에서는 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 Cr 도금표면은 油膜의 지속성이 나빠 표면에서 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. 5와 Fig. 6의 결과에서 Ni-Cr 분말을 이용한 용사 표면과 鋼 분말을 이용한 용사 표면의 마모량을 비교하면 鋼 분말을 이용한 용사표면 마모량이 더 작음을 보이고 있다. 한편 Fig. 2에서 이들 두 시험편의 표면 경도를 비교하면, Ni-Cr 분말의 용사표면 경도가 더 높은 결과를 보이고 있다. 이와 같이 鋼 용사 표면의 경도 값은 더 낮음에도 불구하고 마모

량이 더 작게 되는 현상을 규명하기 위해, 마모 시험이 끝난 두 종류의 시험편에 대해 SEM 사진 촬영을 실시하여 그 결과를 Photo. 1에 나타내었다.

이 결과에 의하면 Ni-Cr 분말 용사 시험편의 경우는 용사 입자 상태로 표면으로 부터 탈락된 흔적을 보이고 있으나, 鋼 분말 용사 시험편의 경우는 음착 마모 현상에 의해 마모된 흔적을 보이고 있다. 따라서 Ni-Cr 분말은 용융온도가 너무 높아서 충분히 용융 되지 않은 상태로 소지 표면에 부착되어 입자와 입자사이의 밀착강도가 저하하기 때문에, 쉽게 탈락하여 마모가 빨리 진행하지만, 鋼 분말 용사의 경우는 그와는 달리 입자 사이의 밀착강도가 높아 쉽게 탈락마모되지 않기 때문에, 마모량이 작아지는 것으로 사료된다.

#### 4. 결론

1. 마찰 계수는 단강재 표면 그대로인 상태가 가장 크고 Cr 도금처리, Ni-Cr 용사처리, 鋼 분말 용사 처리 順으로 작아진다.
2. 건식 상태에서의 마모량은 단강재 표면 그대로인 상태에서 가장 크고, Ni-Cr 용사 표면, 鋼 용사 표면, Cr 도금처리 표면 順으로 Cr 도금처리 표면이 가장 작게 나타났다.
3. 1회의 윤활유 침지 상태에서의 마모량은 단강재 표면 그대로인 상태에서 가장 크고, Cr 도금 표면, Ni-Cr 용사 표면, 鋼 용사 표면의 順으로 작아져서 鋼 용사표면의 마모량이 가장 작게 나타났다.
4. 油膜의 지속성은 단강재 표면이나 Cr 도금 표면에 비해서 용사처리 표면에서 매우 양호하게 된다.
5. Ni-Cr 용사표면은 마멸시 용사입자의 탈락에 의해 마멸이 진행되나 鋼 용사표면은 음착 마멸에 의해 진행되기 때문에 경도가 높은 Ni-Cr 용사 표면의 마모량에 비해 경도가 낮은 鋼용사 표면의 마모량이 현격히 감소한다.

Table 1. Chemical compositions of Ni-Cr spray powder(wt.%)

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

Table 2. Chemical compositions of Steel spray powder (wt.%)

Fe	Al	Mo	C
Bal.	10	1	0.2

Table 3 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 4 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

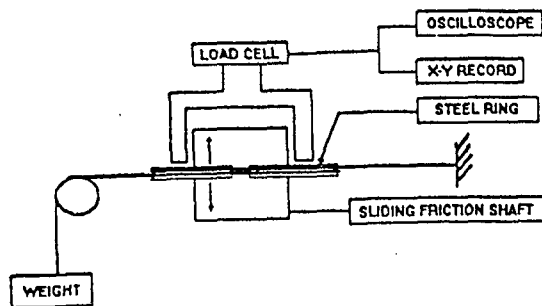


Fig. 1 Schematic illustration of friction and wear test

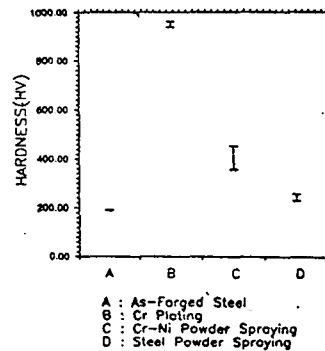


Fig. 2 Result of micro-hardness test of coating layer

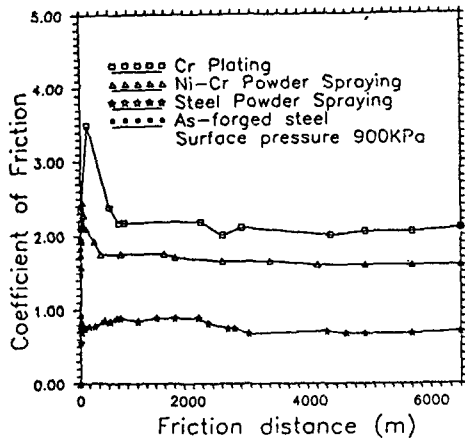


Fig. 3 Relation between friction distance and coefficient of friction with coating material in dry condition

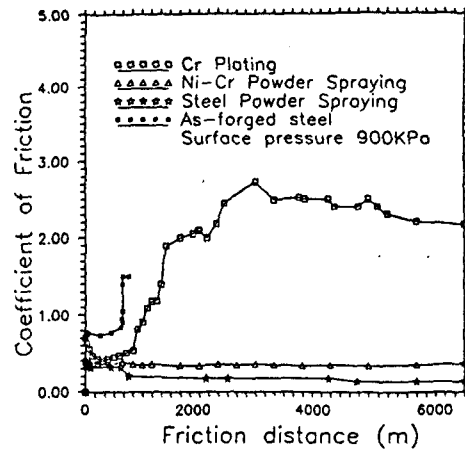


Fig. 4 Relation between friction distance and coefficient of friction with coating material in lubrication condition

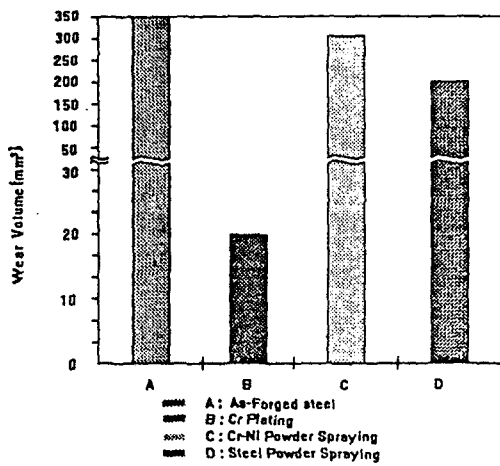


Fig. 5 The comparison of wear volume with surface coating material in dry condition (Surface pressure=900KPa)

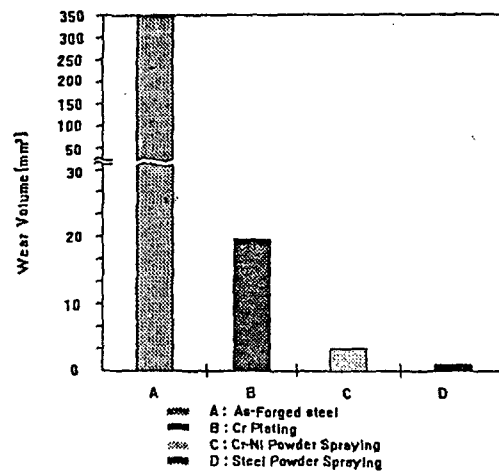
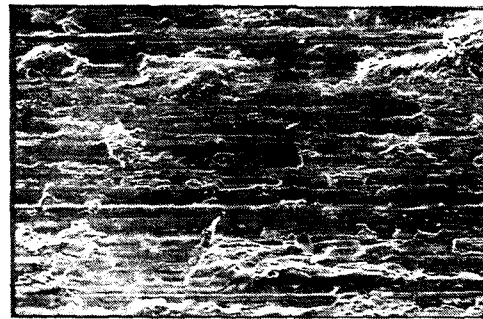


Fig. 6 The comparison of wear volume with surface coating material in lubrication condition (Surface pressure=900KPa)



(a) Worn surface of Ni-Cr powder spray specimen  
 (b) Worn surface of Steel powder spray specimen  
 Photo. 1 SEM photographs of worn surface in dry condition and surface pressure=900KPa