

Fe-Cr-B 용사코팅층의 슬라이딩 마멸 특성

The characteristics of sliding wear for thermal sprayed Fe-Cr-B alloys

류병진, 오세일, 박병노, 김강형, 유인석
 삼성중공업 건기연구소 소재연구파트

1. 서론

기계에서 요구되는 정밀도는 향상되고, 기계의 사용환경의 가혹화에 수반하여 더욱더 재료의 고기능화에 대한 요구가 높다. 기계 부품의 요구 조건인 내식성과 내열성, 내피로성 그리고 내마모성을 높이기 위한 방법으로 재료의 요구 특성과 경제성을 고려한 종합적인 측면에서 고기능화된 재료를 개발하기 위하여 표면 개질 기술을 여러 방면으로 연구하고 있다. 이러한 표면 개질 기술 중에서도 용사코팅법은 내열 내마모용 코팅 분야에서 널리 이용되고 있다. 용사코팅(thermal spray coating)이라는 것은 와이어(wire) 또는 파우더(powder)형태의 용사재를 이용하여 고온의 열원으로 용융시킨 후 모재에 고속으로 분사시켜 모재 표면에 피막을 형성하는 기법으로써 용사코팅재료로는 금속, 비금속, 서멧, 세라믹, 카바이드, 플라스틱 및 그들 상호간의 복합물이나 또는 모재의 육성을 위해 모재와 동일한 재료도 사용하고 있으며, 용사기법으로는 용사코팅재료의 용융을 위한 열원의 종류에 따라서 화염용사(flame spray), 아크용사(arc spray), 플라즈마용사(plasma spray), 폭발용사(high velocity oxygen fuel spray) 등이 있다. 용사코팅은 임의의 곡면에 피복층을 형성할 수 있고, 피복층의 두께를 임의로 제어가능하며, 용사코팅재료와 모재 각각의 우수한 기계적, 물리적 성질만을 선택 가능함으로 인하여 단열과 내열, 그리고 내마모성이 동시에 요구되는 항공산업, 자동차산업 등 부품의 기능향상에 용사코팅기술이 적용되고 있으며 최근에는 그 기술의 확대폭이 크게 증가하고 있다. 용사코팅층의 내마모성을 향상시키기 위한 물성으로는 용사코팅층과 모재표면의 계면접착강도(bonding strength)의 향상, 코팅층의 균일성(homogeneity), 낮

은 기공율(porosity), 높은 경도 등을 필요로 하기 때문에 요구조건에 부응하는 용사코팅재료와 용사기법을 선택하여야 한다.

고하중, 고속의 윤활상태에서는 마찰마멸현상은 마찰부의 표면계면에 존재하는 윤활막의 발생 압력이 접촉하중을 지지하며, 표면의 상태와 윤활막의 두께에 따라 부분적인 고체 접촉이 존재하기도 한다. 윤활상태의 분류는 마찰재료 각각의 복합표면조도와 윤활막의 두께비에 따라서 완전탄성유체윤활, 부분탄성유체윤활, 경계윤활 등으로 나누어 진다. 윤활유막의 두께를 h , 복합표면조도 $R'_v = (R_a^2 + R_w^2)^{0.5}$ 라고 하면 비유막두께 $\lambda (= h/R'_v)$ 가 3 이하이면 부분탄성유체윤활, 3 이상이면 완전탄성유체윤활로 분류하기도 한다. (1,2,3) 표면접촉의 상태에서 비유막두께 λ 가 3 이상인 탄성유체윤활의 상태에서 수명의 증가가 비유막두께 λ 가 1 이하인 경계윤활상태에서의 수명보다 현저히 증가하였음을 보여 주었다. (2)

본 연구에서는 용사코팅재료의 용사기법에 따른 용사코팅층의 기계적 물성을 파악하고 SM48C 고주파 경화 시편과 용사코팅재료와의 고하중, 고속 윤활상태에 따른 슬라이딩 마멸특성을 파악하고자 하였다.

2. 실험

2.1 실험시편

용사코팅을 위한 모재로는 일반구조용 강인 SM48C를 QT (quenching, tempering)하여 사용하였고, 모재의 표면을 sand blasting한 후 용사코팅하였다. 상대마찰재료로는 SM48C강을 고주파 열처리 경화시켜 표면경도를 HRC 60 ~ 63 으로 조정하였다. 용사코팅재료로는 Fe-Cr-B계의 와이어와 분말을 각각 TWAS(트윈아크용사, twin arc

spray), 용접(MIG), HVOF(폭발용사, high velocity oxygen fuel spray) 등의 용사코팅공정을 시행하였다. 그리고 용사코팅재료의 슬라이딩 마멸 특성비교실험을 위하여 텅스텐-카바이드(WC)의 소결 시편과 SM48C강의 고주파 열처리 경화 시편을 각각 제작하였다. Table 1 에 시편의 종류와 치수에 대하여 나타내었다. 실험시편의 개략도는 Fig.1 에 도식적으로 나타내었다. 용사코팅층의 표면은 매우 거칠며, 이는 실험에 민감한 영향을 미치므로 표면조도의 차이에 따라 야기되는 인자를 없애기 위해 표면을 연마한 후 폴리싱하여 표면조도를 Ra 0.1 이하로 맞추었다. (3,7) 각각 시편의 마찰면의 표면조도는 축삭식 표면조도기로서 측정하였다. Table 3 는 각 재료의 시편 종류에 따른 표면경도와 기공률(porosity)을 나타낸 것이다. 코팅층의 미세구조는 마멸 특성에 영향을 끼치므로 실험전 코팅층 단면과 표면부의 상태를 광학현미경으로 관찰하였다. Fig. 2 은 실험전의 용사코팅층과 텅스텐-카바이드 소결층의 표면 사진을 나타낸 것이다. 표면 기공률의 분포상태를 파악하기 위하여 상분석기(image analyser)를 이용하여 그 값을 계산하였다.

2.2. 실험장치 및 방법

실험에 사용된 마찰 마멸시험기는 각 재료의 슬라이딩 마멸거동을 파악하기 위하여 블록 온 링 타입(block-on-ring type)의 슬라이딩 마멸 시험기를 사용하였다. 그 주요 부위의 개략도는 Fig. 2. 과 같다. 슬라이딩 속도는 DC모터를 이용하여 제어하였고, 고속(1.31-3.93 m/s), 고하중(1000 N) 윤회상태에서의 실험을 수행하였으며, 이 때의 마멸트랙을 측정함으로써 각 시편의 마멸특성을 관찰하였다. 하중은 스프링력을 이용하여 가하였으며, 각 실험에 있어 oil bath는 세척 후 윤활유를 교체하였으며, 윤활유의 양(250 cc)은 일정하게 공급하였다. 사용 윤활유로는 유공 S/D 5000 GOLD 디젤 엔진오일을 사용하였다. 실험 중의 윤활유의 온도는 90-100 °C로 유지하였다. 실험 후의 각 시편의 마멸트랙의 마멸깊이는 3차원 측정기 및 contour graph를 이용하여 측정하였으며, 마멸트랙의 면적은 상분석기(image analyser)를 이용하여 면적을 계산하였다. 또 마멸특성을 파악하기 위하여 주사전자현미경을 통하여 마멸트랙의 상태를 관찰하였다. Table 2. 에는 실험조건을 나타내었다.

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 3. 에 각 시편의 하중 1000 N, 슬라이딩 속도 2.62 m/s, 실험시간 1×10^6 cycles 의 마멸시험 결과를 제시하였다. Fe-Cr-B계의 용사재료는 용사공정에 따른 마멸량의 정도가 일반강(SM48C)의 고주파 열처리 경화처리를 한 시편보다 적어 슬라이딩 마멸특성이 우수하였으며, Fe-Cr-B계의 TWAS 공정으로 제작된 시편의 경우에는 텅스텐-카바이드 소결재료보다 우수한 슬라이딩 마멸특성을 나타내었다. Fe-Cr-B을 용접한 시편과의 비교에서도 TWAS한 시편의 마멸특성이 우수하였다. Fig. 4. 에는 TWAS와 텅스텐-카바이드 소결 시편 그리고 HVOF 용사코팅한 시편의 하중 1000 N, 슬라이딩 속도 2.62 m/s, 5×10^6 cycles 슬라이딩 마멸시험결과를 나타내었다. 장시간의 마멸시험에서 TWAS 및 HVOF의 용사시편의 마멸특성이 텅스텐-카바이드 소결시편 보다 우수함을 재확인 할 수 있었다. Table 3 에는 각 시편의 경도와 기공률의 상태량을 나타내었는데, 이를 비교하여 보면 텅스텐-카바이드 소결시편의 경도가 상대적으로 높으며, 기공률도 낮은 것을 알 수 있다. 실제적으로 마멸특성에 많은 기여를 하는 변수 중의 하나로 경도, 기공률, 표면조도, 성분, 윤회상태를 상대비교 할 수 있다. (3,4,5,6,7) 그러나 고하중, 고속 윤회상태에서의 블록 온 링 마멸시험특성에서는 경도의 영향보다는 표면의 상태(조도와 기공률)와 그 성분의 요소가 마멸 특성에 많은 영향을 끼친다는 것을 위의 실험결과로부터 유추할 수 있다. 실험 시편의 시험전 표면조도를 Ra 0.1 이하로 조절하였기 때문에 마멸특성의 주요인자로서는 기공률과 표면의 성분이라고 판단할 수 있다. 기공률이 높은 TWAS와 HVOF용사코팅한 시편의 마멸특성이 같은 성분(Fe-Cr-B)의 용접시편과 텅스텐-카바이드 소결시편보다 우수한 결과를 나타낸 것로부터 마찰표면에 존재하는 표면 기공(pore)의 존재가 중요한 역할을 했다고 사료된다. 기공은 윤활유에 접촉 경우, 자체에 윤활유를 함침하여 더욱 우수한 윤활 특성을 발휘하며, 접촉응력의 분산을 촉진시켜 고하중의 접촉상태를 지탱하였다고 추측된다. 그러나 기공의 존재가 다공질 베어링 재료와 같은 역할을 어느 정도 발휘할 수도 있다는 장점도 있으나 기공에서의 응력집중효과와 크랙발생의 가능성 때문에 마찰표면의 기계적인 상태량과의 상호 관계를 고려한 설계가 이루어져야 한다고 판단된다. 특히, 무윤활시에는 기공의 존재가 내마모성을 감소시키

는 촉매의 역할을 한다고 추측된다. Fig. 5 에는 TWAS한 시편에서의 속도 증가에 따른 마멸특성을 나타내었다. 1.31 m/s의 속도에서의 마멸특성이 가장 취약하였으며, 3.93 m/s의 마멸특성보다도 2.62 m/s에서의 마멸특성이 가장 우수하였다. 저속(1.31 m/s)에서의 유막두께는 2.62, 3.93 m/s의 속도보다 상대적으로 감소하므로 마찰표면부에서의 고체접촉(contact of microasperity)이 발생하여 마멸량이 증가된다고 판단되며, 2.62 m/s 속도에서는 탄성유체윤활의 유막의 두께 증가로 인하여 고체접촉의 분율이 상대적으로 감소하여 마멸량이 감소되며, 3.93 m/s 속도인 경우에는 마찰표면에서의 온도상승에 의한 윤활유의 점도 하락으로 윤활상태의 악화와 상대마찰재료의 경도와 강도가 감소하여 이에 따른 마멸량이 증가된 것으로 판단된다. Fig. 6. 에는 TWAS 용사시편의 실험시간의 증가에 따른 마멸량의 정도를 나타내었다. 시간의 증가에 따라 마멸량의 정도도 증가하는 경향을 나타내고 있어, 정상적인 마멸특성이 지속됨을 유추할 수 있다. Fig. 7. 는 시편의 마멸실험후의 마멸트랙의 사진이다. TWAS과 HVOF 용사시편에서는 마찰표면의 기공에서의 파손이 발생하여 표면의 기공이 계속 확대되는 상태를 보여주고 있다. 실험전의 기공의 분포상태와 크기와 비교하여 보면 이를 확인할 수 있다. Fe-Cr-B 용사시편의 경우 고하중, 고속 윤활상태에서는 표면 기공의 분포상태와 크기 그리고 마찰표면부에서의 Micro-EHL 에 대한 최적의 마멸특성을 갖는 영역의 존재가 있다고 추측된다.

4. 결론

TWAS와 HVOF의 용사코팅 공정으로 형성된 용사코팅층의 고하중, 고속 윤활상태에서의 볼록 온 링 슬라이딩 마멸 거동은 일반강의 고주파 열처리 경화처리 시편, 같은 성분(Fe-Cr-B)의 용접시편 그리고 텅스텐-카바이드 소결 시편보다도 우수하였으며, 이는 마찰표면에서의 기공의 역할에서 기인하였다고 판단된다.

Fe-Cr-B 의 TWAS 용사코팅 공정에서의 마멸특성은 시간의 증가에 따라 정상적인 마멸거동을 나타내었으며, 슬라이딩 마찰 속도 2.62 m/s 에서의 마멸특성이 가장 우수하였다.

Fe-Cr-B 의 용사코팅 공정표면의 경도와 기공율이 슬라

이딩 마멸거동에 큰 역할을 미치며, 특히 표면 기공율은 슬라이딩 조건(속도, 하중, 윤활)에 따라서 마멸특성이 우수한 최적의 영역이 존재할 것으로 판단된다.

5. 참고문헌

- (1) H.S.Cheng, Fundamentals of elastohydrodynamic contact phenomena, in N.P.Suh and N.Saka(eds.), Fundamentals of Tribology, Proc. Int. Conf., Cambridge, MA, 1978, pp. 1009-1048.
- (2) T.E.Tallian, On competing failure modes in rolling contact, ASLE Trans., 10(1967) pp 418-439.
- (3) A. G. Khurshudov, Y. N. Drozdov, K. Kato, Transitional phenomena in the lubricated heavily loaded sliding contact of ceramics and steel, WEAR 184 (1995) pp 179-186.
- (4) D. Dowson, Elastohydrodynamic and micro-elastohydrodynamic lubrication, WEAR 190(1995) pp 125-138.
- (5) J. A. Tichy, A porous media model for thin film lubrication, J. of Tribology Vol. 117, JANUARY 1995. pp 16-21.
- (6) S. Ramalingam, L. Zheng, Film-substrate interface stresses and their role in the tribological performance of surface coatings, Tribology International Vol. 28, No. 3, MAY 1995, pp 145-161.
- (7) H. Czichos, Failure modes of sliding lubricated concentrated contacts, WEAR, 28(1974) pp 95-101.

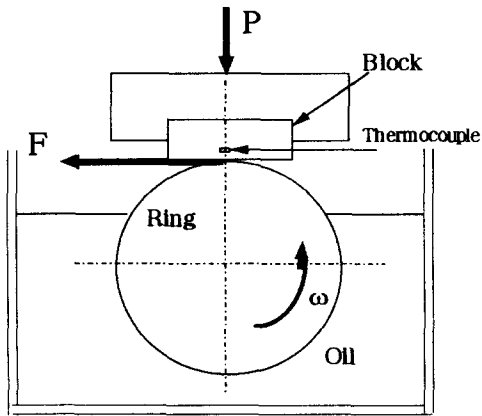
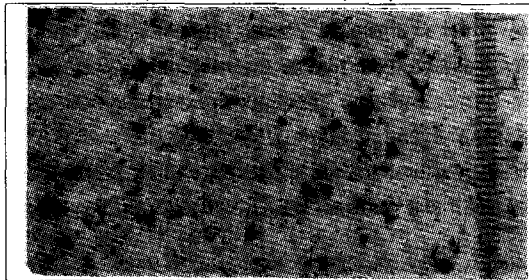


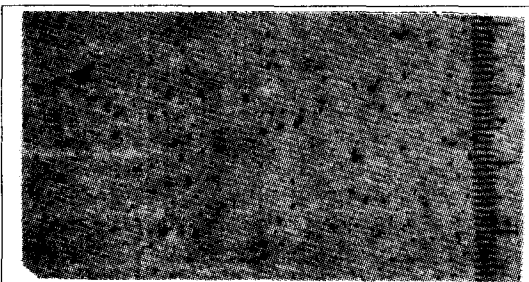
Fig. 1. Principle of experimental equipment



(A) Fe-Cr-B TWAS(wire)



(B) Fe-Cr-B HVOF(powder)



(C) WC sintered

Fig. 2. Surface microstructure of each specimen before the test. ($\times 100$)

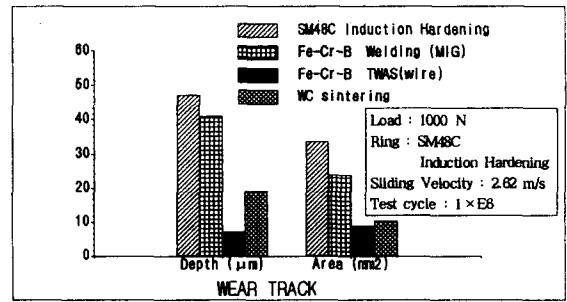


Fig. 3. Wear loss of block specimens at 1×10^6 cycles.

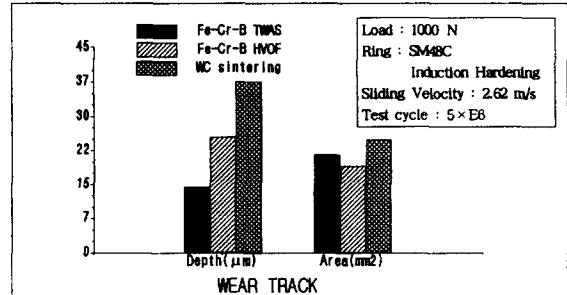


Fig. 4. Wear loss of block specimens at 5×10^6 cycles.

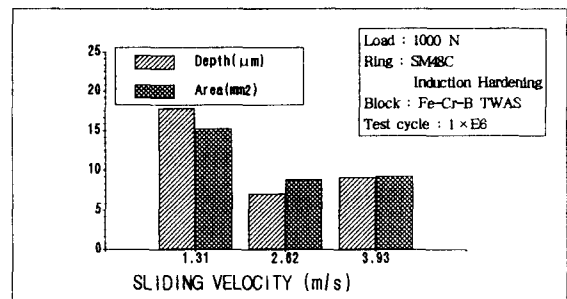


Fig. 5. Wear loss of Fe-Cr-B TWAS block specimen on sliding velocity.

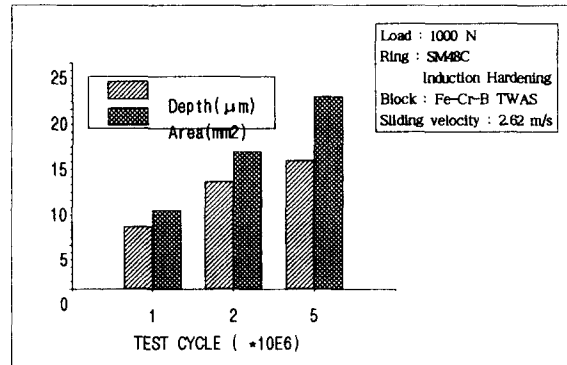
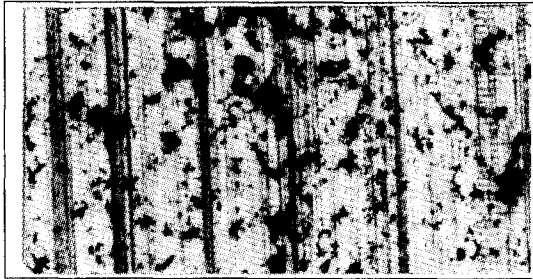


Fig. 6. Wear loss of Fe-Cr-B TWAS block specimen on sliding test cycles.



(A) Fe-Cr-B TWAS(wire)



(B) Fe-Cr-B HVOF(powder)



(C) WC sintered

Fig. 7. Surface microstructure of each specimen after the test.($\times 100$)

Table 1. Experimental materials and geometry

Specimen	Dimension (mm)	Materials
Ring	Diameter : 50 Thickness : 12	SM48C Induction Hardened
Block	18 \times 10 \times 7	SM48C Induction Hardened Fe-Cr-B TWAS(wire) Fe-Cr-B HVOF(powder) Fe-Cr-B Weld(MIG) WC sintered

Table 2. Experimental Conditions

Parameter	Values
Load (N)	1000
Temperature ($^{\circ}$ C)	90 ~ 100
Sliding velocity (m/s)	1.31, 2.62, 3.93
Sliding cycles ($\times 10^6$)	1, 2, 5

Table 3. Mechanical properties of the specimens

Specimen	Hardness	Porosity(%)
SM48C Induction Hardening	HRC 60 ~ 62	-
Fe-Cr-B Welding (MIG)	Hv _{0.2} 600 ~ 800	~ 0.5
Fe-Cr-B TWAS (wire)	Hv _{0.2} 800 ~ 1100	2 ~ 4
Fe-Cr-B HVOF (powder)	Hv _{0.2} 800 ~ 1200	1 ~ 3
WC sintering	Hv _{0.2} 1500 ~ 1800	0.5 ~ 1