

코팅된 요철표면을 가지는 탄소/에폭시 복합재료의 마찰 및 마모 특성

김성수* · 이학구* · 이대길**

Tribological behaviors of polymer coated carbon composite with small surface grooves

Seong Su Kim, Hak Gu Lee and Dai Gil Lee

Key Words : Carbon phenolic composite, Wear, Hybrid composite journal bearing

ABSTRACT

Tribological behaviors of carbon epoxy composites whose surfaces have many small grooves were compared with respect to coating method under dry sliding and water lubricating conditions. The surface coating materials were epoxy (Ep) and polyethylene (PE) mixed with self-lubricating MoS₂ and PTFE powders. The wear morphology of the composites observed with a scanning electron microscopic (SEM) revealed that the surface coating layer mixed with the self-lubricating powder on the grooved surface significantly improved the wear resistance under water lubricating condition because the surface coating layer blocked water to penetrate the composite surface and the self-lubricating powder reduced the wear on the coating by suppressing the generation of blisters.

1. 서론

유체 저널베어링이 장착된 회전체 시스템 중에는 급속한 냉각 효과나 작동 환경의 제한으로 인해 윤활제로서 물을 사용하는 경우가 많다. 특히 대부분의 소형 선박에는 오일 윤활 시스템에 비해 상대적으로 저가이면서 친환경적인 수윤활 시스템이 사용되고 있다. 그러나 점도가 낮은 물을 윤활제로 사용하면 낮은 Sommerfeld number로 인해 윤활막의 형성이 힘들기 때문에 축과 베어링은 경계 윤활 상태에 놓이게 되어 마찰 및 마모가 심하게 발생할 수 있다 [1]. 특히 해수를 윤활제로 사용하

는 선박용 저널베어링의 경우 해수에 포함된 불순물이 베어링 내부로 유입되어 심각한 연삭 마모를 일으킬 수 있으며 염분에 의한 부식이 발생한다 [2].

저널베어링의 소재는 회전하는 주축을 보호하고 마찰로 인한 열발생을 줄이기 위하여 주축의 소재보다 상대적으로 낮은 경도와 낮은 마찰 계수 및 높은 열전도계수가 요구된다. 저널베어링의 라이너 (Liner) 소재로 널리 사용되고 있는 화이트메탈 (White metal)은 주석이나 납에 안티몬과 구리로 구성된 합금으로 위에서 언급된 저널베어링의 조건을 만족하지만, 급속 주축과는 같은 급속이기 때문에 직접 접촉 시 마찰열에 의하여 주축과 고착될 수가 있으며, 수윤활 상태일 때는 수분이나 염분에 의해 부식이 발생할 수 있다 [3]. 또한 복합재료 주축과 같은 신소재 주축을 사용하는 회전

* 한국과학기술원 기계공학과 대학원

** 한국과학기술원 기계공학과 교수

체 시스템의 경우에는 복합재료가 화이트메탈보다 상대적으로 경도가 낮기 때문에 화이트메탈과의 마찰에 의해서 주축이 손상을 받기 쉽다 [4].

이러한 문제들을 해결하기 위해 기존의 수운활식 저널베어링의 재료로 기름을 함침시킨 목재가 널리 사용되고 있다. 목재는 금속 재료에 비해 경도가 낮기 때문에 운행 중에 발생한 마모 입자나 외부로부터 유입된 불순물들이 표면에 압입되기가 용이하며, 베어링 장착 도중 발생할 수 있는 저널과 베어링의 정렬 불량 (Misalignment)을 스스로 교정할 수 있는 자가중심 (Self-alignment) 효과가 뛰어나다. 또한 오일을 함침시켰기 때문에 유수분리 효과에 의하여 해수 중에 포함된 염분으로부터의 부식을 줄일 수 있다. 그러나 목재는 강도가 낮고 마찰 및 마모 특성이 취약하기 때문에 수명이 짧으며, 중소형 선박의 경우 기름을 함침시킨 목재 베어링이 해수에 노출되기 때문에 심각한 환경 오염을 유발할 수 있다. 목재 베어링을 장착할 때는 하우징에 억지끼워맞춤으로 압입시키기 때문에 장착 시에 파손이 일어날 가능성이 있다. 또한 저널베어링 재료로 쓰이는 목재는 전량 수입에 의존하고 있기 때문에 재료비가 다른 베어링 재료에 비해 저렴하다고 볼 수 없다.

따라서 본 연구에서는 수운활 상태에서 복합재료의 마모 특성을 개선하기 위해, 표면 요철을 가지는 복합재료에 폴리에틸렌 (PE) 필름 또는 PE와 자체 윤활 특성을 지니는 이황화몰리브데늄 (MoS_2) 분말의 혼합물로 만든 필름을 도포하여 마모 시험을 수행하였다. 또한 비교 분석을 위해, 건마찰 상태에서 테프론 (PTFE)과 에폭시 수지 (Epoxy resin)의 혼합물을 도포하여 마모 시험을 수행하였다.

2. 시편 제작 및 실험 장치

표면 요철을 가지는 탄소/에폭시 복합재료의 제작 과정은 Fig. 1 과 같다. 서로 다른 두께와 높이를 가지는 금속 박판을 순차적으로 배열한 후 볼트로 체결하여 표면 요철을 가지는 금형을 제작하였다. 요철 표면에 탄소/에폭시 복합재료를 적용하여 진공백 (Vacuum bag) 성형법으로 경화시켰다. 성형된 시편의 요철 표면 위에 두 가지 방법으로 고분자 재료를 코팅하였으며, 사용된 코팅 재료는 Table 1 과 같다. 에폭시 수지는 분말들과의 혼합을 위해 메탄올로 희석시켜 점도를 낮추었으며, 혼합물을 요철 표면에 압입한 후 경화 과정에서 메탄올을 제거하였다. PE 분말은 단독으로 사용하거나

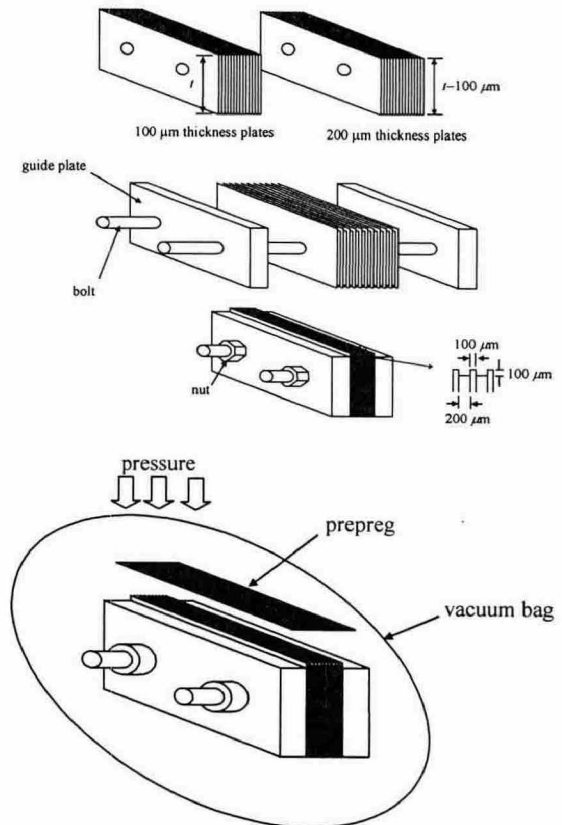


Fig. 1 Fabricating process of the concave mold and specimens (patent pending); (a) mold fabrication method, (b) molding process for the composite with many small grooves.

MoS_2 또는 PTFE 분말과 혼합하여 $75 \mu\text{m}$ 두께의 필름을 성형하였다. 이 때 혼합물 및 필름에서 모재 (Matrix)와 분말의 혼합 부피 비율은 7:3 이다.

Table 1. Properties of materials used in fabricating the coating

Coating materials	Density (g/cm^3)	Particle size (μm)
Matrix	Epoxy	Liquid resin
	PE	30
Powder	PTFE	10
	MoS_2	2

제작된 마모 시편의 광학 현미경 사진은 Fig. 2 와 같다. 실험 장치는 핀 온 디스크 형태 (Pin on disk type)이며 원판의 재질은 베어링강 (AISI-E52100) 이다. 시편 지그의 양면에 부착된 스트레인 게이지 (Strain gauge)로 마찰력을 측정하였다. 수운활 상태에서 마모 실험을 실시할 때는 원판위에 아크릴 파이프 재질의 수조를 제작하여 설치하

였다.

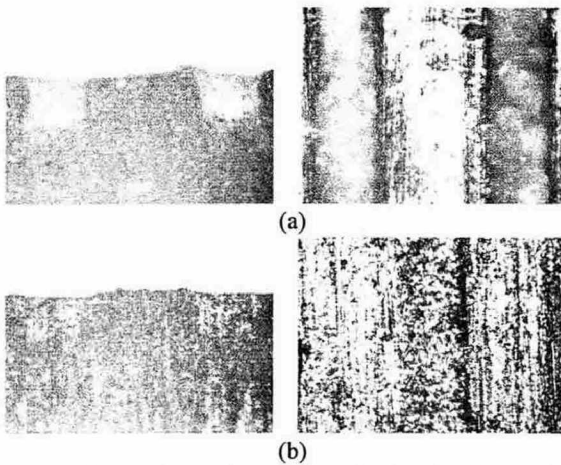


Fig. 2 Grooved specimens coated with lubricants; (a) epoxy-based coating with PTFE, (b) PE-based coating with MoS₂.

시험 하중 (13.4 MPa)은 대형 선박의 주축을 지지하는 저널 베어링의 최대 유막 압력값에 근접하는 값이며 속도 (0.06 m/s) 또한 출발 및 정지 시에 주축의 회전 선속도 범위에 포함되는 값이다.

3. 마모 시험

3.1 건마찰 시험

시편의 종류에 따른 건마찰 상태에서의 평균 마찰계수는 Table 2 와 같다.

Table 2. Mean friction coefficients of the specimens under dry condition

Type of mixed powder	Friction coefficients
Epoxy+PTFE	0.35
Epoxy+MoS ₂	0.32
PE+PTFE	0.22
PE+MoS ₂	0.20
Uncoated	0.22

실험 결과, PE를 모재로 하는 코팅 시편의 평균 마찰계수는 에폭시의 경우에 비해 약 57% 감소하였다. 이는 열경화성 수지인 에폭시가 열가소성 수지인 PE에 비해 상대적으로 높은 경도를 가지며 취성이 강하기 때문이라 분석될 수 있다. 또한 PE 시편의 평균마찰계수는 코팅이 안된 요철 시편의 값과 유사한 값을 가짐을 확인하였다. 이는 마찰 계면에서 발생한 마모 입자들이 경도가 낮은

PE 층으로 압입되기 때문이라 판단된다. PE와 MoS₂의 혼합 필름으로 코팅된 시편의 마모된 표면은 Fig. 3 과 같다.

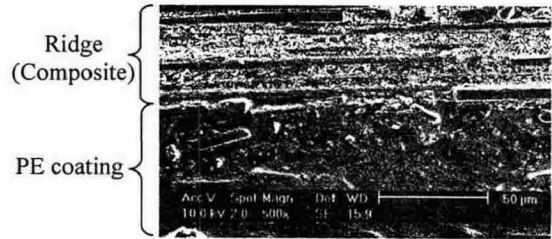


Fig. 3 Abrasive particles generated from the ridges could be embedded into grooves filled with PE-based coating materials

시간에 따른 각 시편의 마찰 계수의 변화는 Fig. 4 와 같다. 동일한 모재 (Matrix)를 가질 때 MoS₂가 포함된 시편이 PTFE가 포함된 시편보다 더 작은 마찰 계수를 가짐을 확인하였다.

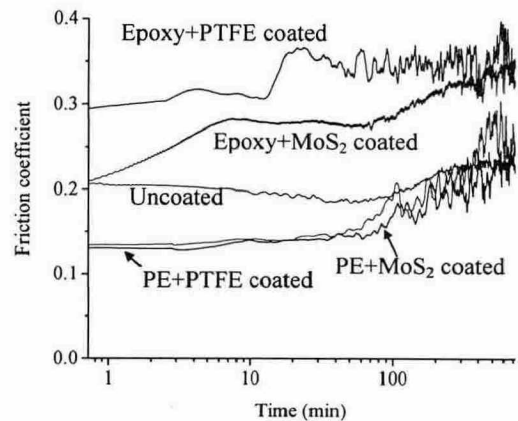


Fig. 4 Friction coefficients of the grooved specimens w.r.t. coating materials.

따라서 건마찰 상태에서 PE와 MoS₂가 혼합된 코팅층을 요철 표면에 코팅할 경우가 마모 입자들의 효과적인 제거를 통해 가장 뛰어난 마모 특성을 보임을 알 수 있었다.

3.2 수윤활 시험

건마찰 상태에서 뛰어난 마모 특성을 보인 PE와 MoS₂ 필름 코팅의 수윤활 상태에서의 마찰 및 마모 특성을 조사하였다. 자체 윤활 분말의 영향을 알아보기 위해 코팅 처리하지 않은 시편과 PE 필름 코팅의 마모 시험을 병행하였다. 각 시편의 평균마찰계수는 Table 3 과 같다.

Table 3. Mean friction coefficients of the specimens under water lubricated condition

Specimens	Friction coefficients
Uncoated	0.15
PE coated	0.15
PE+MoS ₂ coated	0.16

실험 결과 세 가지 종류의 시편이 유사한 수준의 마찰 계수를 보였다. 그러나 시간에 따른 마찰 계수를 나타내는 Fig. 5를 보면 시험 초기의 MoS₂가 들어간 시편의 마찰 계수가 상당히 낮은 값을 보임을 알 수 있다.

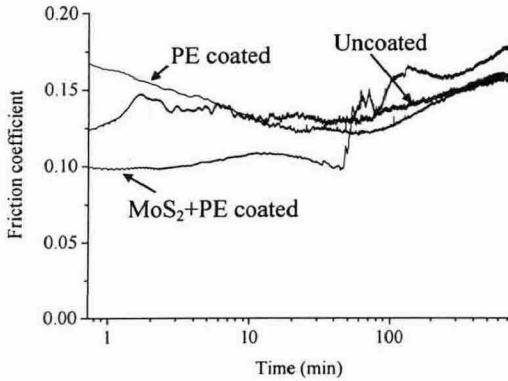


Fig. 5 Friction coefficients of the grooved specimens w.r.t. coating materials under water lubrication.

마모 특성을 조사하기 위해 각 시편의 마모면을 SEM (scanning electron microscopic)으로 관찰하였다. Fig. 6에서 코팅 처리가 안된 시편의 경우는 요철 표면의 구분이 힘들 정도로 마모가 진행되었지만 PE 코팅과 PE 와 MoS₂의 혼합 코팅의 경우는 복합재료 부분과 코팅층이 구분됨을 볼 수 있다. 이는 코팅 층이 복합 재료와 수분과의 접촉 면적을 감소시켜 수분에 의한 물성 저하를 억제했기 때문이라 판단된다. PE 필름이 코팅된 시편의

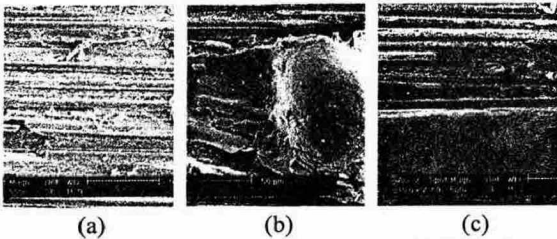


Fig. 6 Scanning electron micrographs (SEM) of worn surfaces; (a) uncoated, (b) PE coated, (c) PE+MoS₂ coated.

경우 Fig. 6(b)와 같이 코팅 층에 용기 (Blister)가 관찰되었으며 이것이 코팅 층의 마모를 촉진시킴을 알 수 있었다. 여기에 MoS₂를 혼합할 경우 상대적으로 변형에 대한 저항이 큰 MoS₂ 층이 PE 층을 눌러줌으로써 용기의 생성을 억제시키기 때문에 마모율이 낮아졌다고 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 수윤활 상태에서 복합재료의 마찰 및 마모 특성을 향상시키기 위해 고분자 재료를 표면 요철을 가지는 복합재료에 코팅하는 방법을 개발하였다. 건마찰 상태에서의 마모 시험 결과 PE 와 MoS₂의 혼합물을 필름 형태로 제작하여 코팅한 시편의 경우가 마모 입자의 제거에 가장 큰 효과를 보임을 확인하였다. 수윤활 상태에서는 PE 코팅 및 PE 와 MoS₂의 혼합물로 코팅된 시편이 재료의 물성 저하를 방지함으로써 코팅 처리되지 않은 시편의 경우보다 월등한 마모 특성을 보임을 알 수 있었다.

참고문헌

- (1) Hamrock J., Fundamentals of Fluid Film Lubrication, McGraw-Hill Co., Chapter 10, 1994.
- (2) Bhushan B., Gray G., "Investigation of material combinations under high load and speed in synthetic seawater", Lubr Eng. Vol. 35, No. 11, 1978, pp. 628-639.
- (3) Suh N. P., Tribophysics, Prentice-Hall, Inc., New Jersey, Chapter 6, 1986.
- (4) Lee D. G., Kim S. S., "Failure Analysis of Asbestos-Phenolic Composite Journal Bearing", Composite Structures, Vol. 65, No. 1, 2004, pp. 37-46.