

# 하이브리드 복합재료 저널 베어링의 개발

김성수\* · 박동창\* · 이대길\*\*

## Development of the Hybrid Composite Journal Bearing

Seong Su Kim, Dong Chang Park and Dai Gil Lee

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

### ABSTRACT

In this study, a hybrid composite journal bearing composed of carbon fiber reinforced phenolic composite liner and metal backing was manufactured to solve the seizure problem of metallic journal bearing materials because the carbon fiber has self-lubricating ability and the phenolic resin has thermal resistance characteristics. To estimate the wear resistance of carbon fiber phenolic composite, wear tests were performed at several pressures and velocities. The oil absorption characteristics, coefficient of thermal expansion, strength and stiffness of the composite were also tested. Using the measured stiffness values, the thermal residual stresses in the composite were calculated to check the reliability of the composite journal bearing.

### 1. 서 론

대형 선박의 주축을 지지하는 스텐 튜브 저널 베어링 (Stern tube journal bearing) 은 일반적인 저널 베어링보다 높은 압력 하에서 낮은 속도로 운행되기 때문에 낮은 Sommerfeld 수를 가지며, Thick film 윤활 상태를 유지하기 어려운 점이 있다 [1]. 특히 출발할 때와 정지할 때, 낮은 회전 속도로 인해 충분한 유막 발생이 어려우며 이로 인해 저널 (Journal)과 베어링 사이는 경계 윤활 상태가 된다. 이 경우 윤활유의 온도 상승으로 인해 점성이 저하되어 베어링과 저널 사이에 직접적인 접촉이 발생할 수 있다. 따라서 선박용 저널 베어링으로 쓰이는 재료는 높은 열전도 계수를 가짐으로써 윤활막에서 발생한 열을 외부로 방출시키는 용이하여야 하며 경계윤활 상태에서 응착

(Welding)이나 긁힘 (Scoring)에 의한 손상을 최소화할 수 있어야 한다 [2].

현재 선박용 저널 베어링은 주철 베어링에 화이트 메탈 (White metal)을 라이닝(Lining) 한 것을 주로 사용하고 있다. 하지만 화이트 메탈의 경우 132~149°C 에서 크립 (Creep)이 발생하기 때문에 저널과 베어링 사이에 접촉 (Contact)이 발생할 경우 마찰열에 의해 응착 (Seizuring)이 발생할 수 있다. 실제로 화이트 메탈을 스텐 튜브 저널 베어링 (Stern tube journal bearing)에 적용한 대형 선박의 경우 대양을 횡단하는 도중 베어링에 응착이 발생하여, 자가 운항이 불가능한 사례가 발생하고 있으며 이를 견인하는데 많은 비용이 소요되고 있다.

이러한 화이트 메탈의 응착 문제를 해결하기 위해 일부 대형 선박에는 섬유 강화 복합재료 베어링이 사용되고 있으며 복합재료의 모재로서 널리 쓰이고 있는 재료가 페놀이다. 페놀은 윤활유에 의한 화학적 침식(Chemical attack)에 대한 저항성이 뛰어나며 탄성계수가 작기 때문에 불임성

\* 한국과학기술원 기계공학과 대학원

\*\* 한국과학기술원 기계공학과 교수

(Conformability)이 뛰어나며 낮은 경도 때문에 마모 입자나 모래 같은 불순물이 쉽게 함입(Embedding)될 수 있다. 또한 페놀 복합재료는 인성이 높기 때문에 피로(Fatigue)나 충격 하중에 의한 손상을 줄일 수 있다 [3].

그러나 고분자 재료는 유체의 함침에 의한 팽창(Swelling)으로 인해 치수(Dimension) 변화가 발생할 수 있으며 낮은 열전달계수(Thermal conductivity)로 인해 유막에서 발생한 열을 외부로 방출시키기에 용이하지 못하다. 화이트 메탈과 같은 금속 재료는 원심 주조법을 이용하여 얇은 두께로 코팅하는 반면, 복합 재료 저널 베어링은 금속 하우징(Housing)에 억지끼워맞춤하기 때문에 이로 인해 발생하는 압축 응력이 베어링의 파손을 초래할 수 있다 [4].

고온 환경 하의 로켓 노즐에 사용되는 탄소-페놀 복합 재료는 건조한 상태에도 윤활성이 좋기 때문에 금속 베어링 재료의 윤착 문제를 해결할 수 있을 뿐만 아니라 기존의 섬유 강화 페놀 복합 재료에 비해 강도가 높기 때문에 윤활막의 온도 상승에 의한 잔류 열 응력과 오일 흡수에 의한 팽창으로 인해 발생하는 압축 응력에 의한 파손을 방지할 수 있다 [5]. 동시 경화법(Co-curing)이나 접착제 접합 방법을 사용하면 억지끼워맞춤에 의한 응력 발생을 제거할 수 있다. 또한 얇은 두께로 금속하우징에 접착하기 때문에 페놀의 낮은 열전도 계수를 보상할 수 있을 뿐만 아니라, 재료비의 절감 효과도 가져올 수 있다. 탄소 섬유는 다른 섬유에 비해 마찰 계수가 상당히 낮기 때문에 베어링의 마모특성 또한 기존의 복합 재료 저널 베어링에 비해 월등할 것으로 예상된다. 따라서, 본 연구에서는 여러 가지 기계적 물성 시험과 마모 시험을 통해 베어링 재료로써 탄소-페놀 복합 재료가 석면-페놀 복합재료보다 적합함을 규명하고, FE-analysis 를 이용한 응력 해석을 통해 실제 저널 베어링에 적용했을 경우 탄소-페놀 복합 재료의 구조적 안정성을 평가하고자 한다.

## 2. 기계적 물성 시험

복합재료 저널 베어링은 억지끼워맞춤에 의해 하우징에 장착될 때나 운전 과정에서 유막의 온도가 상승할 경우 원주 방향으로 큰 압축 응력을 받게 된다 [4]. 따라서 베어링 재료로써의 복합재료는 원주 방향으로 큰 압축 강도를 가져야 하며 두께 방향으로 낮은 열팽창계수 및 Swelling 을 가져야 한다.

본 연구에서는 저널 베어링으로 사용되는 석면-페놀 복합재료의 기본적인 기계적 물성을 측정하여 탄소 페놀 복합재료의 물성과 비교 분석하였다. 탄소 페놀 복합재료는 직조 섬유이기 때문에, Warp 방향의 물성을 1 (Hoop), Weft 방향의 물성을 2 (Axial), 그리고 두께 방향의 물성을 3 (Radial)으로 지정하였다. 두 재료의 TMA (Thermomechanical analyzer) 실험을 통한 열팽창 계수 측정, 다양한 조건에 따른 복합재료의 Swelling 실험을 통한 수분팽창계수(Coefficient of hygroscopic expansion)를 측정하였으며 원주 방향에 따른 각각의 물성은 Table 1 과 같다.

Table 1. Mechanical properties of two composite materials in the circumferential direction.

	carbon/phenolic	asbestos/phenolic
compressive strength (MPa)	220	86.2
CTE ( $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ )	1.23	7.19
swelling (%)	0.01	0.03

실험 결과로부터 저널 베어링 재료로써 탄소 페놀 복합재료의 기계적 물성이 석면 페놀 복합재료의 그것보다 훨씬 뛰어난 것을 알 수 있다.

## 3. 마모 시험

### 3.1 실험 방법

마모 시험에 쓰인 시편의 형상과 미끄럼 방향은 Fig. 1 과 같다. 석면 페놀 복합재료의 미끄럼 방향은 선박용 저널 베어링에서 저널이 회전하는 방향과 같다. 탄소 페놀 복합 재료는  $[0/90]_{4s}$ 로 적층하여 경화시켰고 미끄럼 방향은 Warp 방향과 일치하도록 하였다.

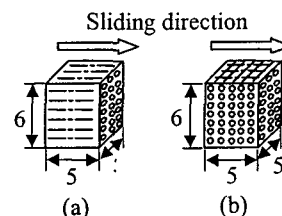


Fig. 1 Schematic diagram of the wear specimens; (a) Asbestos phenolic, (b) Carbon phenolic.

실험 장치는 핀 온 디스크 형태 (Pin on disk type)로써 Fig. 2 과 같다. 원판의 재질은 베어링강(AISI-E52100)이며 직경과 두께는 각각 240mm, 12mm 이다. 주파수 변환기를 사용하여 원판의 회

전 속도를 제어하였고 시편 지그의 양면에 부착된 스트레인 게이지 (Strain gauge)로 마찰력을 측정하였다.

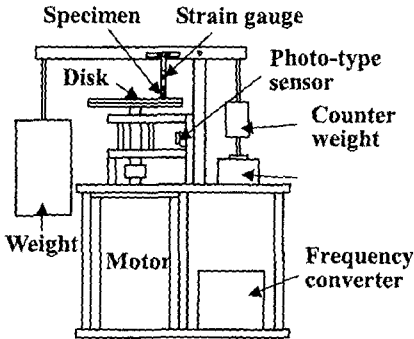


Fig. 2 Schematic diagram of the pin-on-disk type wear tester.

마모로 인한 질량 손실은 0.1mg의 정밀도를 가진 저울 (Microbalance)을 사용하여 측정하였으며 마모 부피는 식 3.1과 같다.

$$V = M_i / \rho \quad (3.1)$$

where,

$V$ : Wear volume

$M_i$ : Mass loss

$\rho$ : Density of the material

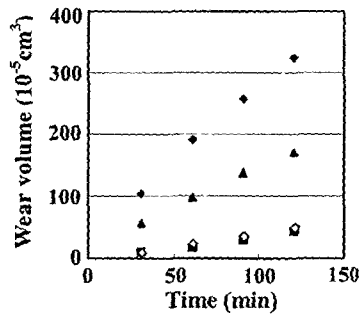
마모 시험에 있어 재료의 마모 특성을 나타내는 대표적인 값이 하중과 속도의 곱으로 나타내는 PV 한계 (PV limit)이다. 이 값에 따르면 주어진 하중 값에 따라 허용 속도가 결정되며 반대로 주어진 속도에 따라 허용 하중이 결정된다. 본 연구에서는 탄소 페놀 복합 재료의 PV 한계 값인 2.0MPa·m/s에 따라 시험 하중과 속도를 (Case 1 : 1.2MPa, 1.7m/s), (Case 2 : 1.6MPa, 1.25m/s)의 조합으로 하여 측정하였다. 시험에 쓰인 하중은 대형 선박의 주축을 지지하는 저널 베어링의 최대 유막 압력값에 근접하는 값이며 속도 또한 주축의 회전 속도 범위에 포함되는 값이다.

실험은 25°C, 65% R.H.에서 진행되었으며 이러한 조건을 유지하기 위해 마모 시험기를 아크릴 Chamber 내에 위치시켜 실험하였다.

### 3.1 실험 결과

마모량은 30분을 주기로 측정되었으며 마모 거리에 따른 각 재료의 마모량은 Fig. 3과 같다. 석면 페놀 복합재료의 경우 속도는 감소하고 하중이 증가한 Case 2가 Case 1보다 마모량이 약 2배정

도 크게 나왔음을 볼 때 하중의 영향을 크게 받을 수 있다. 이는 석면 페놀 복합재료의 높은 기공율 (Void ratio)과 낮은 강도에서 그 원인을 찾을 수 있다. 재료 내부에 산재한 기공들 때문에 실제 접촉 면적은 겉보기 접촉 면적에 비해 작다. 따라서 하중이 증가할 경우 돌기에 가해지는 압력이 겉보기 면적 기준의 압력보다 훨씬 크기 때문에 소성 변형을 일으킨 돌기의 수가 증가했을 것으로 추측된다. 또한 섬유들이 조금씩 마모되어 얇아지는 동안 상대 마찰면의 표면 돌기들에 의해 수직력과 마찰력을 계속적이고 반복적으로 받음에 따라 복합재료에 내부에 전단력에 의한 크랙 (Crack)이 형성되어 덩어리 형태로 떨어져 나가는 박리 마모가 발생했을 가능성이 크다. 특히 석면 페놀 복합재료의 경우는 내부의 기공이 크랙 (Crack)의 발생 및 진전에 큰 영향을 미쳤을 것으로 판단된다. 하중이 증가한 Case 2의 경우 모재 (Matrix)와 섬유의 일부가 심하게 뜯겨져 나간 자국을 볼 수 있었다. 따라서 실험 속도가 감소하여 마모 거리가 짧아지더라도 마모량이 더 크게 나왔다고 예상할 수 있다. 따라서 석면 페놀 복합재료의 마모 메카니즘 (Wear mechanism)은 상대 마찰면의 돌기와 그로 인해 발생한 연삭 입자들에 의한 연삭 마모로부터 출발하여 마모 입자가 덩어리 형태로 떨어져 나가는 박리 마모로 발전하는 형태로 볼 수 있다.



- ▲ Asbestos phenolic (P:30N, V:1.7m/s)
- ◆ Asbestos phenolic (P:40N, V:1.25m/s)
- ◇ Carbon phenolic (P:30N, V:1.7m/s)
- Carbon phenolic (P:40N, V:1.25m/s)

Fig. 3 Wear volume of two composites w.r.t. time.

반면 탄소 복합재료의 경우는 두 가지 실험 조건에서의 마모량이 큰 차이를 보이지 않음을 알 수 있는데, 이는 탄소 페놀 복합재료의 자체 윤활 특성으로 설명될 수 있다. 탄소 섬유는 분자 구조가 판상으로 이루어져 있기 때문에 마모가 진행되

면 표면에 물질 이착막을 형성하게 된다. 따라서 마모거리가 증가하면 이러한 막들이 마모 트랙을 덮게 되고 결국은 이종 재료 간의 마모가 아닌 동일한 재료 사이의 응착 마모가 발생한다. 따라서 주어진 시험 하중과 속도가 이러한 막을 제거할 정도가 아니면 마모량이 다른 재료에 비해 극히 적을 뿐만 아니라 PV 한계 내에서 하중과 속도가 변하더라도 마모량은 거의 변하지 않는다고 판단할 수 있다.

#### 4. 하이브리드 복합재료 저널 베어링

본 연구에서는 기계적 물성 시험과 마모 시험을 통해 저널 베어링 재료로서 기존의 복합재료에 비해 월등한 특성을 가지는 탄소 페놀 복합재료를 이용하여 하이브리드 (Hybrid) 저널베어링을 설계하였다. 복합 재료의 낮은 강도 문제와 비용 절감을 위해 복합 재료를 얇은 두께의 라이닝 (Lining) 형태로 금속 후판 (Metal backing)에 적층하였다. 복합재료의 두께는 강도, 마모 특성 및 재료비 등을 고려하여 4 mm 로 하고 적층 순서 (Stacking sequence)는 원주 방향과 길이 방향의 강도를 고려하여  $[0/90]_{3s}$  로 하였다. 억지끼워맞춤으로 인한 과도한 압축 응력 발생을 방지하기 위해 동시 경화법과 접착제를 사용한 접착 방법을 선택하였다. 동시 경화법의 경우, 제작 공정을 줄일 수 있다는 장점이 있으나 베어링 내면의 치수 정밀도가 떨어지기 때문에 소형 저널 베어링에 적합하다. 접착제를 사용하는 경우, 내외면 금형을 동시에 사용하기 때문에 정확한 치수를 얻을 수 있고 동시 경화법에 비해 높은 접착 강도를 얻을 수 있다는 장점이 있으나, 고가의 금형 비용 때문에 다양한 크기의 베어링을 제작하는 것은 한계가 있다.

설계된 베어링의 정적 안정성을 평가하기 위해 ABAQUS (Hibbit, Karlsson & Sorensen Inc., USA)를 사용하여 유한 요소 해석 (Finite element analysis)을 수행하였다. 기계적 물성 시험을 통해 구한 탄소 페놀 복합 재료의 물성 값을 바탕으로 실제 구동 조건과 유사한 조건에서 복합 재료 베어링의 응력 해석을 수행하였다. 하이브리드 복합재료 베어링의 응력 분포는 Fig. 4 와 같다. 해석 결과, 복합재료의 원주 방향으로 42 MPa 의 최대 압축응력이 발생함을 알 수 있으며 이 값은 탄소 페놀 복합재료의 압축 강도 (220 MPa)보다 훨씬 낮은 값이다. 따라서 정적 하중이 작용할 때, 하이브리드 복합재료 베어링은 5.2 의 안전 계수 (Safety factor)를 가짐을 알 수 있다.

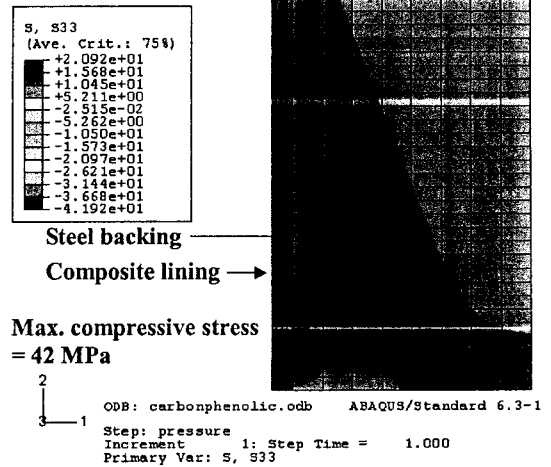


Fig. 4 Stress distribution of the hybrid composite journal bearing in the circumferential direction.

#### 5. 결론

본 연구에서는 기존의 화이트메탈의 응착 (Seizing) 문제와 복합재료 베어링의 억지끼워맞춤과 Swelling 으로 인한 과도한 응력 발생 문제를 해결하기 위해 하이브리드 탄소 페놀 복합재료 저널 베어링 설계하였다. 재료의 기계적 물성 실험 결과, 탄소 페놀 복합재료가 기존 베어링 재료인 식면 페놀 복합재료보다 약 260%의 압축강도, 17%의 열팽창계수, 50%의 Swelling 을 가짐을 확인하였다. 마모 시험 결과, 탄소 페놀 복합재료의 마모 부피는 기존 재료의 1/10~1/5 정도임을 알 수 있었다. 이러한 재료의 물성 시험 결과로부터 베어링 설계 인자들을 결정하였으며 정적 응력 해석 결과, 최대 발생 응력이 재료 강도의 19% 정도임을 확인하였다.

#### 참고문헌

- (1) J. Hamrock, Fundamentals of Fluid Film Lubrication, McGraw-Hill Co., Chapter 10, 1994.
- (2) J. Hamrock, Fundamentals of Fluid Film Lubrication, McGraw-Hill Co., Chapter 5, 1994.
- (3) J. F. Shackelford, Materials Science for Engineers, Prentice Hall, New Jersey, Chapter 13, 2000.
- (4) D. G. Lee, S. S. Kim, "Failure Analysis of Asbestos-Phenolic Composite Journal Bearing", Composite Structures, accepted for publication.
- (5) N. P. Suh, Tribophysics, Prentice-Hall, Inc., New Jersey, Chapter 6, 1986.