

억지끼워맞춤을 이용한 하이브리드 복합재료 저널베어링의 설계

김성수* · 이대길*

Design of the Hybrid Composite Journal Bearing Assembled by Interference Fit

Seong Su Kim and Dai Gil Lee

Key Words: HCJB, Carbon/phenolic composite, Interference fit joining

ABSTRACT

In this work, a hybrid composite journal bearing (HCJB) composed of carbon/phenolic laminated composite bush and steel housing was designed for marine vessels because the composite journal bearing reduces the possibility of the seizure problem between the journal and bearing. The two components of bearing were assembled by interference fit joining method and a series of durability tests were conducted using the laboratory bench with the lubricants of SAE 30 oil, water, and sea water. That the HCJB was found reliable under the interference fitting loads and environmental temperature change.

1. 서 론

비강성 및 비강도가 우수한 탄소 섬유 복합재료는 산업 전반에 걸쳐 그 수요가 증가하고 있으며, 특히 뛰어난 마찰 및 마모 특성은 저널 베어링 재료에 적합하다. 저널베어링의 소재는 회전하는 주축을 보호하고 마찰로 인한 열 발생을 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, 금속 주축과는 같은 금속이기 때문에 직접 접촉 시 마찰열

에 의하여 주축과 고착될 수 있다 [1]. 또한 복합재료 주축과 같은 신소재 주축을 사용하는 회전체 시스템의 경우에는 복합재료가 화이트메탈보다 상대적으로 경도가 낮기 때문에 화이트메탈과의 마찰에 의해서 주축이 손상을 받기 쉽다 [2].

이러한 문제들을 해결하기 위해 기존의 저널베어링의 재료로 석면 페놀 복합재료가 널리 사용되고 있다. 석면 페놀 복합재료는 필라멘트 와인딩 (Filament winding) 공법을 이용하여 제작되며, 억지끼워맞춤에 의해 하우징 (Housing)에 장착된다. 그러나 석면 페놀 복합재료의 낮은 강성 및 강도로 인해 억지끼워맞춤 시 좌굴에 의한 파손이 발생할 수 있고, 재료의 높은 열팽창 계수 및 Swelling rate 로 인해 저널 베어링의 운전 시 온도가 상승할 경우 베어링 내부에 높은 압축 응력이 발생할 수 있다 [3]. 또한 석면 페놀 저널베어링은 전량 수입에 의존하고 있기 때문에 재료비가 다른 베어링 재료에 비해 저렴하다고 볼 수 없다.

* 한국과학기술원 기계공학과 대학원

* 한국과학기술원 기계공학과 교수

따라서 본 연구에서는 기존 저널베어링 재료의 문제점을 개선하기 위해, 탄소 페놀 복합재료 부쉬 (Bush)와 금속 하우징 (Metal housing)이 억지끼워맞춤으로 결합된 선박용 하이브리드 복합재료 저널베어링을 개발하였다. 유한요소해석을 이용하여 억지끼워맞춤 시 발생하는 응력 분포를 구하였으며 실험을 통해 이를 검증하였다. 또한 시제품을 제작하여 내구성 시험을 수행함으로써 하이브리드 복합재료의 안전성을 검증하였다.

2. 유한요소법을 이용한 응력 계산

부쉬 제작에 사용된 탄소 페놀 복합재료의 물성은 Table 1 과 같다. 이를 이용하여 억지끼워맞춤 시 저널베어링 내부에 발생하는 응력 분포를 유한요소법을 사용하여 구하였다. 복합재료 부쉬의 외경과 하우징의 내경은 Locational interference fit 에 따라 86.2H7/P6 공차를 사용하여 결정하였으며 이로부터 억지끼워맞춤 양은 10 μm 와 20 μm 로 각각 결정되었다 [4].

Table 1 Mechanical properties of carbon/phenolic fabric composite

	Hoop	Radial	Axial
CTE ($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	1.23	40.7	1.84
Maximum swelling in oil (%)	0.01	0.09	0.02
Elastic modulus (GPa)	61.5	14.3	61.4
Compressive strength (MPa)	264	809	221

유한요소해석을 위해 상용프로그램인 ABAQUS 6.5 (ABAQUS Inc., RI, USA) 를 사용하였으며, 베어링의 형상이 대칭구조이기 때문에 축대칭 모델 (Axi-symmetric model)을 이용하였다. 복합재료 부쉬와 하우징의 접촉면에서의 마찰 계수는 선행 연구 결과로부터 0.1-0.3 으로 결정하였다. 탄소 페놀 복합재료 프리프레그 (Prepreg)의 적층 순서는 $[0/90]_4s$ 이며 베어링의 원주 방향이 90° 이다.

3. 실험을 통한 해석의 검증

해석 결과의 검증을 위하여 탄소페놀 복합재료 부쉬와 하우징을 제작하여 억지끼워맞춤에 의한 접합 시험을 수행하였다. 시편의 형상 및 치수는 해석 결과를 바탕으로 Fig. 1 과 같이 결정하였다. 복합재료 부쉬는 맨드릴 (Mandrel)에 프리프레그를 적층한 후 진공백성형법으로 경화시킨 후 외면

을 정밀하게 가공하여 제작하였다.

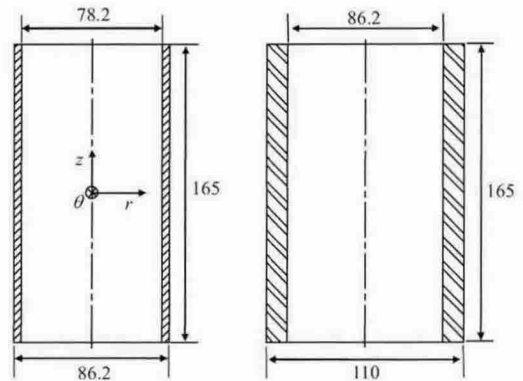


Fig. 1 Schematic diagram of the specimen; (a) Composite bush, (b) Steel housing.

경화 후 부쉬 외면에 발생하는 주름을 최소화하기 위해 맨드릴 외면에 프리프레그를 적층한 후 0.3 mm 두께의 스테인레스 박판을 감았다. 박판을 고정하고 가압하기 위해 Fig. 2 와 같이 박판 외면에 고압 밴드를 장착했다.

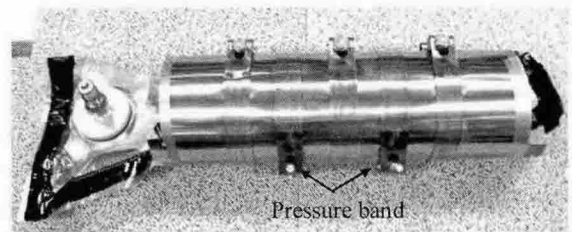


Fig. 2 Photograph of the composite bush before cure

실험은 정적 만능시험기 (INSTRON4469, MA, USA)를 사용하였고, 복합재료 부쉬의 변형률 (Strain)을 측정하기 위해 Fig. 3(a)와 같이 내면에 스트레인게이지를 부착하였다.

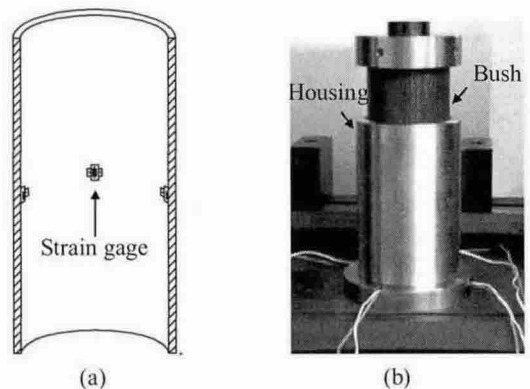
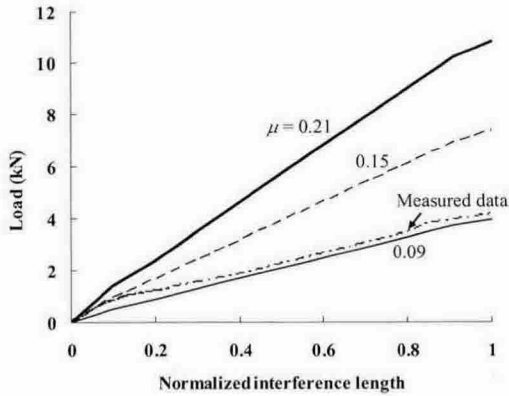
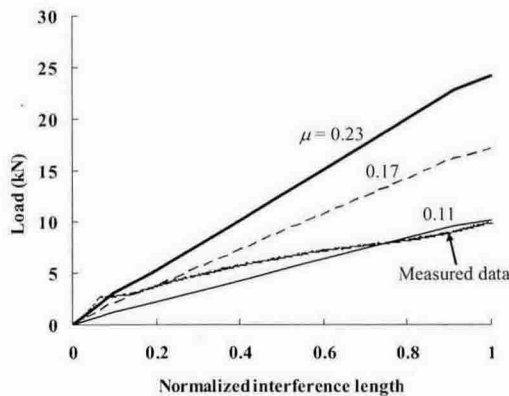


Fig. 3 Schematic configuration of the test; (a) Inner surface of composite bush, (b) Process of interference fit joining.

준비된 시편을 Fig. 3(b)와 같이 만능시험기에 장착한 후 1mm/min의 속도로 압입하였다. 마찰 계수에 따른 유한요소법으로 구한 하중-변위값과 실험으로부터 구한 값의 비교는 Fig. 4와 같다.



(a)



(b)

Fig. 4 Measured and calculated load-displacement curves by FEM with respect to friction coefficient (μ) when the interference amounts were; (a) 10 μm , (b) 20 μm .

실제로 부쉬의 외면과 하우징 내면 사이의 마찰계수를 정확하게 예측하기 힘들기 때문에 유한요소법으로 응력해석을 할 경우 여러 가지 마찰계수 값을 선택하였다. 그 결과 억지끼워맞춤 양이 각각 10 μm , 20 μm 일 때에 대해 마찰 계수가 각각 0.09, 0.11 일 때 두 개의 결과가 거의 일치하였다.

이를 검증하기 위해, 해석 결과로부터 얻은 접촉면에 발생하는 반경방향으로의 평균응력을 하중 P 로 하고 부쉬의 압입 속도인 1mm/min 을 속도 V 로 하여 마찰 계수를 측정하였으며 그 결과는 Fig. 5 와 같다.

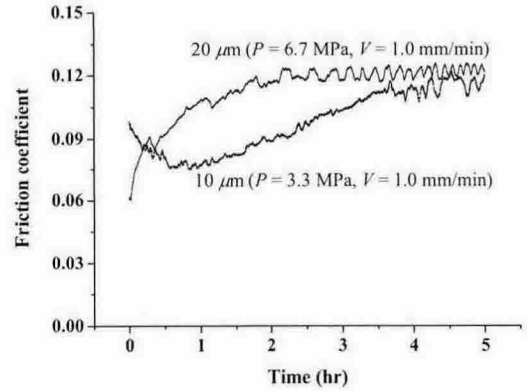


Fig. 5 Measured friction coefficients with respect to interference fitting amount,

실험결과에서 볼 수 있듯이 각각의 억지끼워맞춤 양에 대한 평균 마찰 계수는 유한요소해석에 사용된 마찰 계수와 거의 유사함을 알 수 있었다.

복합재료 부쉬의 길이에 따른 각 방향의 응력을 구해본 결과 최대 압축응력은 원주 방향에서 발생하였으며 억지끼워맞춤 양이 20 μm 일 때 그 값은 29.1 MPa 로서 원주 방향의 압축 강도 값인 264 MPa 에 비해 매우 낮은 값을 확인하였다. 실험에서 측정된 변형률로부터 응력을 계산했을 때 해석값과의 오차는 7%였다.

Table 2 Maximum compressive stresses on the contact surface of composite bush w.r.t. temperature for each interference fit amount. (unit: MPa)

	10 μm			20 μm		
	R.T.	50°C	-30°C	R.T.	50°C	-30°C
Radial	3.3	0.1	8.9	6.7	3.4	12.3
Hoop	14.4	3.7	42.1	29.1	17.9	55.5
Axial	4.4	0.4	7.1	11.3	5.1	9.5

실제 환경에서 선박이 운행될 때는 지역 또는 계절에 따라 온도 변화의 폭이 크다. 따라서 온대 지방에서 선박이 건조되어 한대 지방이나 열대 지방으로 운행 시에는 약 $\pm 30\sim 50^\circ\text{C}$ 정도의 온도 차가 발생한다. 이러한 온도 차는 저널베어링 내부의 응력분포나 억지끼워맞춤에 의한 접합력에 영향을 줄 수 있다. 따라서 억지끼워맞춤 후에 온도

에 따른 최대 압축 응력을 유한요소법을 이용하여 Table 2 와 같이 구하였다.

온도가 상승했을 경우, 복합재료 부쉬의 원주 방향으로의 열팽창 계수 ($1.2 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)가 구조강의 열팽창 계수 ($11.0 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)보다 작기 때문에 최대 압축응력은 감소한다. 반면 온도가 하강했을 경우는 최대 압축응력이 증가하게 되고 이때의 최대 압축 응력은 Table 2 에서 볼 수 있듯이 탄소 페놀 복합재료의 강도보다 훨씬 작았다. 온도가 상승했을 경우 억지끼워맞춤에 의한 접합력이 감소하기 때문에 베어링의 구동 시에 부쉬와 하우징 사이의 접촉면에서 미끄럼 (Slip)이 발생할 수 있다. 이를 확인하기 위해 Table 3 과 같이 각각의 억지끼워맞춤 양에 따라 온도가 상승했을 경우 접촉면에서의 최소 마찰력을 구한 후 접촉면에 발생하는 축 (Journal)에 의한 접선력 (Tangential force)과 비교하였다.

Table 3 Tangential load on the inner surface of the composite bush and minimum friction forces between the composite bush and steel housing

	Friction force (kN)	Tangential load (kN)
10 μm	0.40	0.77
20 μm	13.7	

그 결과 억지끼워맞춤 양이 10 μm 일 때 접촉면에서 미끄럼이 발생함을 알 수 있었다.

온도가 하강했을 경우 복합재료 부쉬에 발생하는 압축 응력이 파손에 영향을 주는지 여부를 확인하기 위해 해석 결과를 이용하여 Fig. 6 과 같이 부쉬의 길이를 따라 Tsai-Wu index 를 구하였다.

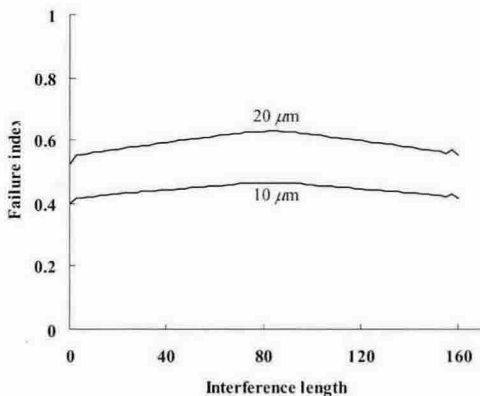


Fig. 6 Tsai-Wu tensor failure indices at the temperature of -30°C for each interference fit amount when the bearing was assembled at 20°C .

그 결과 두 가지 억지끼워맞춤 양의 경우 모두 파손에 대해 안전함을 확인하였다.

4. 내구성 시험

설계에 따라 제작된 하이브리드 복합재료 저널 베어링의 신뢰성 확보를 위해 Fig. 7 과 같이 실제 저널베어링 장치를 모사하여 제작한 실험 장치를 사용하여 내구성 시험을 수행하였다.

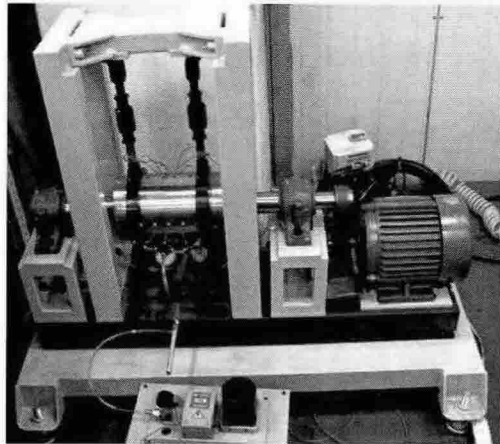


Fig. 7 Photograph of equipment for endurance test and lubricating system.

윤활유는 SAE 30, 담수, 해수를 사용하였고 각각의 경우에 대해 500 시간 동안의 실험이 종료된 후 베어링 내면 및 축의 표면을 관찰하였다. 실험 결과 베어링 내면에는 무시할 수 있을 정도의 미세한 연삭 마모 흔적을 제외하고는 어떠한 균열이나 손상도 발견되지 않았다. 축의 경우도 실험 전후의 표면 거칠기는 0.2 μm 로 동일하였다.

5. 결론

본 연구에서는 탄소 페놀 복합재료를 이용하여 선박용 하이브리드 복합재료 저널 베어링을 설계, 제작하였다. 유한요소법을 사용하여 복합재료 부쉬와 하우징이 억지끼워맞춤에 의해 접할 때 응력 분포를 구하였으며 실험을 통해 이를 검증하였다. 해석 및 실험 결과로부터, 억지끼워맞춤 양이 10 μm , 20 μm 일 때 부쉬와 하우징 간의 접촉면에서의 마찰 계수가 각각 0.09, 0.11 임을 확인하였다. 온도에 따른 베어링의 응력 상태를 유한요소법을 사용하여 구한 결과 온도가 -30°C 로 하강

했을 경우에는 두 가지 억지끼워맞춤 양의 경우 모두 파손에 대해 안전함을 확인하였다. 그러나 억지끼워맞춤 양이 10 μm 일 경우 온도가 50°C 상승했을 때 접촉면에서 미끄럼이 발생함을 알 수 있었다. 따라서 억지끼워맞춤 양이 20 μm 일 때가 응력에 관한 설계 조건을 모두 만족함을 확인하였다. 500 시간 동안의 내구성 시험 결과 베어링 내면과 축의 외면 어떠한 균열이나 파손이 발생하지 않았음을 확인하였다. 따라서 본 연구로부터 억지끼워맞춤은 하이브리드 복합재료 저널베어링을 제작할 때 사용할 수 있는 적절한 접합 방법임을 알 수 있었다.

참고문헌

- (1) Hamrock J., Fundamentals of Fluid Film Lubrication, McGraw-Hill Co., Chapter 10, 1994.
- (2) Kim S. S., Park D. C., Lee D. G., "Characteristics of Carbon Fiber Phenolic Composite for Journal Bearing Materials," Composite Structures, Vol. 66, 2004, pp. 359-366.
- (3) Lee D. G., Kim S. S., "Failure Analysis of Asbestos-Phenolic Composite Journal Bearing," Composite Structures, Vol. 65, No. 1, 2004, pp. 37-46.
- (4) Shigley J. E., Mischke C. R., Mechanical Engineering Design, McGraw-Hill Co., Chapter 2, 2001.