

터보 컴프레셔용 복합재료 틸팅 패드 저널 베어링의 오일 공급 중단 상황에서의 내구성 연구

최강영* · 정민혜** · 유준일*** · 송승아* · 김성수*†

Study on the Durability of Composite Tilting Pad Journal Bearing for Turbo Compressor System under Oil-cut Situation

Kang-Yeong Choe*, Min-Hye Jung**, Jun-Il You***, Seung-A Song*, Seong-Su Kim*†

ABSTRACT: The tilting pad journal bearing for the turbo compressor application has a role to support high speed and heavy loading rotor. White metal has been widely used for the bearing material but the conventional bearing is immediately suspended and induces serious serious damage to the rotor under the unexpected oil cut situation or the insufficient oil film formation. The carbon fiber reinforced composite having high specific stiffness, specific strength and excellent tribological characteristics can solve these seizure problems. In this work, the study on the durability of high thermal resistance carbon fiber/epoxy composite tilting pad journal bearing under oil cut situation was conducted. The material properties of the composite materials including tensile, compressive and interlaminar properties were measured at room and high temperature of oil cut situation. To investigate the possibility of failure of composite tilting pad journal bearing under oil cut situation, the stress distribution of the composite bearing was analyzed via finite element analysis and the Tsai-Wu Failure index was calculated. To verify the failure analysis results, the oil cut tests for the composite tilting pad journal bearing were conducted using industrial test bench.

초 록: 터보/컴프레셔(Turbo compressor)용 틸팅 패드 저널 베어링(Tilting pad journal bearing)은 고속, 고하중의 주축(Rotor)을 지지하는 역할을 하며, 화이트 메탈(White metal)이 대표적인 소재로 널리 사용되어왔다. 그러나 예기치 않은 윤활유 공급 중단 상황(Oil cut situation) 또는 베어링과 주축 사이에 유막(Oil film)이 제대로 형성되지 않을 경우, 기존의 화이트 메탈 베어링은 용착(Seizure) 현상에 의해 바로 정지하게 되고 주축에 심각한 손상을 유발한다. 이러한 용착 문제를 해결하기 위해 기존의 화이트 메탈에 비해 높은 비강성, 비강도 그리고 뛰어난 마찰 특성(Tribological characteristic)을 가지는 탄소섬유 강화 복합재료(Carbon fiber reinforced composite)가 틸팅 패드 저널 베어링에 사용될 수 있다. 본 연구에서는 고 내열성 탄소섬유/에폭시 복합재료 틸팅 패드 저널 베어링의 오일 공급 중단 상황에서의 내구성에 대한 연구를 진행하였다. 이를 위해 상온 및 오일공급 중단상황의 고온에서 인장, 압축, 전단 등의 기초적인 복합재료 물성 실험을 진행하였고, 복합재료 틸팅 패드 저널 베어링에 있어 가장 중요한 물성인 층간 계면 강도를 측정하기 위해 Short Beam Shear 실험을 진행 하였다. 오일 공급 중단 상황에서 복합재료 틸팅 패드 저널 베어링의 파손(Failure) 가능성을 알아보기 위해 유한 요소 해석(Finite element analysis)을 진행함으로써 베어링 표면에 가해지는 최대 응력을 도출하였고, 해석 결과와 물성 시험으로부터 측정된 강도 값을 이용하여 Tsai-Wu Failure index를 계산하였다. 해석 결과를 검증하기 위해 산업용 테스트 벤치를 이용하여 탄소섬유/에폭시 복합재료로 제조된 틸팅 패드 저널 베어링의 오일 공급 중단 실험을 진행하였다.

Key Words: 탄소섬유/에폭시 복합재료(Carbon fiber/epoxy composite), 복합재료 틸팅 패드 저널 베어링(Composite tilting pad journal bearing), 유한 요소 해석(Finite element analysis), 오일 공급 중단(Oil cut situation)

Received 24 March 2016, received in revised form 26 June 2016, accepted 30 June 2016

*†Chonbuk National University, corresponding author (E-mail: sskim@bnu.ac.kr)

**KCTECH.

***UDM Co., Ltd.

1. 서 론

터보 컴프레서는 조선해양플랜트에서 운용되는 여러 가지 설비에 공압을 생성하여 제공하는 핵심 기반 설비 중의 하나이다. 터보 컴프레셔용 틸팅 패드 저널 베어링은 고속 회전 기기에 있어 전체 시스템을 모니터링하는 각종 센서가 부착되고, 고속 고하중의 주축을 지지하는 역할을 한다. 화이트 메탈이 대표적인 소재로 널리 사용되어 왔다. 하지만, 예상하지 못한 오일 공급 중단 상황 또는 베어링과 주축 사이에 유막이 충분하게 형성되지 않았을 때 기존의 화이트 메탈로 제조된 베어링은 윤착 현상에 의해 바로 정지하게 되고 주축에 심각한 손상을 유발한다.

높은 비강도와 뛰어난 마찰 특성을 가지는 탄소섬유/페놀 복합재료(Carbon fiber/phenol composite)는 이러한 금속 베어링의 윤착 문제를 해결하기 위한 대표적인 소재 중 하나로 널리 사용되어 왔다. 그러나 탄소섬유/페놀 복합재료는 에폭시 기반의 복합재료에 비해 낮은 유리전이온도(Glass transition temperature, T_g)를 가지기 때문에 높은 온도에서 급격한 물성 저하(Degradation)가 발생하게 된다[1,2]. 물성저하로 부터 오는 강성과 강도의 감소는 하중 수용 능력(Load carrying capacity)을 저하시키고, 설계 값 보다 낮은 하중 조건에서 구조적인 파손이 발생하게 된다[3].

오일 공급이 중단 되면, 주축은 베어링과 직접적인 접촉을 하게 되고 매우 큰 전단력(Shear force)이 베어링에 가해진다. 이로 인해 베어링 표면에 가해지는 마찰력의 증가로 인한 베어링의 온도가 상승함으로써 층간전단강도 저하를 유발하여 심각한 층간 박리에 의한 파손을 일으킬 수 있다. 따라서 고온에서 높은 층간전단강도와 물성은 오일 공급 중단 상황에서 베어링의 내구성을 향상시켜 줄 수 있는 매우 중요한 요소들이다.

많은 연구자들이 복합재료 저널 베어링의 마찰마모 특성과 내구성 측면에 대해 선행 연구를 진행하였다. 하지만 대부분의 연구들은 베어링의 정상 가동 상태(Steady state condition)에서의 복합재료 저널 베어링의 파손 해석(Failure analysis)을 수행하였다[4-6].

본 연구에서는 상온뿐만 아니라 오일 공급 중단 상황에서 발생할 수 있는 고온 환경에서의 탄소섬유/에폭시 복합재료의 기계적 물성 변화를 연구하였다. 오일 공급 중단 상황과 유사한 조건을 부여하여 유한 요소 해석을 진행함으로써 베어링 표면에 발생하는 응력 변화를 연구하였다. 또한 오일 공급 중단 상황에서 Tsai-Wu failure index를 계산하여 복합재료 틸팅 패드 저널 베어링의 파괴 가능성을 예측하였다. 해석 결과를 검증하기 위해 복합재료 틸팅 패드 저널 베어링을 제조한 후 실제 운용 조건을 모사한 테스트 벤치(Test bench)를 이용하여 오일 공급 중단 실험을 진행하였다.

2. 재료 및 실험

2.1 기계적 물성

본 실험에서는 유리전이온도가 175°C 이상인 고내열성 탄소섬유/에폭시 프리프레그(3K plain weave, SKYFLEX H15, SK Chemical, Korea)를 Cross-ply 적층각으로 적층한 후 핫프레스를 이용하여 Fig. 1의 경화 사이클에 따라 물성 시험용 시편을 제작하였다.

오일 공급 중단 상황에서 복합재료 틸팅 패드 저널 베어링의 구조해석을 위해, ASTM 규격에 근거하여 인장, 압축, 전단 시험(Iosipescu test)을 진행함으로써 복합재료의 공학상수 값(Engineering constants)을 구하였다. 각각의 시험에 대해 5개 이상의 시편을 시험하여 평균 물성값을 도출하였다. 물성 시험 및 베어링 구조 해석에 사용된 좌표계는 Fig. 2와 같다. 1, 2, 3 방향은 각각 틸팅 패드 베어링에서의 Axial, Hoop, Radial 방향을 나타낸다.

오일 공급 중단 실험이 진행되면, 고속으로 회전 중이던 주축과 복합재료 패드 사이에 직접적인 접촉이 발생하고, 이로 인해 발생하는 마찰력으로 온도가 상승하게 된다. 따라서 본 연구에서는 선행 연구 결과 얻어진 오일 공급 중단 시 상승하는 온도 150°C 에서 기계적 물성 실험을 진행하여 탄소섬유/에폭시 복합재료의 물성 변화를 연구하였다[7].

또한, 오일 공급 중단 상황에서 주축에 의해 복합재료 표면에 매우 큰 전단력(Shear force)이 가해지기 때문에 상온 및 고온에서의 층간전단강도는 베어링의 내구성 평가에 있어 매우 중요한 물성이다. 본 연구에서는 온도 변화에 따른 Short Beam Shear 시험을 진행함으로써 복합재료의 층간전단강도를 측정하였다.

2.2 유한 요소 해석

본 연구에 적용된 틸팅 패드 저널 베어링 주축의 회전 속

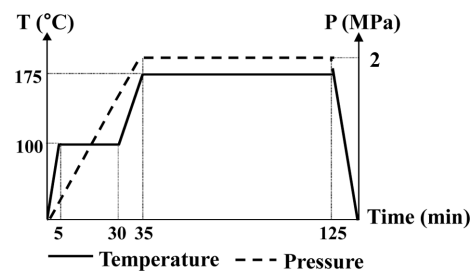


Fig. 1. Curing cycle

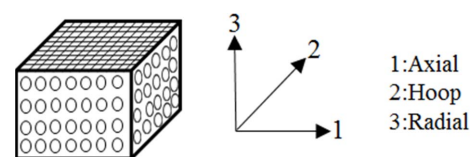


Fig. 2. Material coordinate

도는 약 18,000 RPM이다. 하지만, 오일 공급이 중단되면 주축의 회전 속도가 감소함에 따라 유막 두께 또한 감소하게 되고, 임계 회전 속도에서 주축과 베어링의 직접적인 접촉이 발생하게 된다. 따라서 베어링 표면에 가해지는 주축의 전단력을 계산하기 위해서는 임계 회전 속도를 계산할 필요가 있다.

Oil film parameter(λ)는 최소 유막 두께(h_{min})와 주축 및 복합재료의 표면 거칠기를 이용하여 복합재료 틸팅 패드 저널 베어링의 4가지 중요한 윤활 상태를 정의하는데 사용될 수 있다[8].

$$\lambda = \frac{h_{min}}{\sqrt{(R_{q,c})^2 + (R_{q,r})^2}} \quad (1)$$

여기서 $R_{q,c}$ 는 복합재료의 표면 거칠기, $R_{q,r}$ 는 주축의 표면 거칠기를 나타낸다.

1. 유체윤활(Hydrodynamic lubrication), $5 < \lambda < 100$
2. 탄성유체윤활(Elastohydrodynamic lubrication), $3 < \lambda < 10$
3. 부분윤활(Partial lubrication), $1 < \lambda < 5$
4. 경계윤활(Boundary lubrication), $\lambda < 1$

상기 윤활 상태 중 Partial lubrication 상태에서 주축과 베어링의 직접적인 접촉이 발생한다고 볼 수 있다.

Fig. 3은 유한차분법(Finite difference method, FDM)을 이용하여 주축의 회전 속도에 따른 최소 유막 두께를 계산한 결과이다.

본 연구에서는 $\lambda = 3$ 이 되게 하는 최소 유막 두께를 계산한 후, 그에 상응하는 회전 속도를 Fig. 3의 비례식을 이용하여 계산함으로써 접촉 직전의 주축의 임계 회전 속도(2596 RPM)를 구하였다. 유한 요소 해석을 위해 상용 소프트웨어인 ABAQUS(ABAQUS 6.4, Dassault Systems, France)를 사용하였다. 유한 요소 해석 조건은 아래와 같다.

틸팅 패드 저널 베어링은 구조적인 특성으로 인해 패드 하나에 주축이 접촉하는 LOP(Load On Pad) type 보다는 Fig. 4(a)와 같이 두 개의 패드에 접촉하는 LBP(Load Between Pad) type이 일반적이다. 또한 LBP type의 접촉 조건 하에서

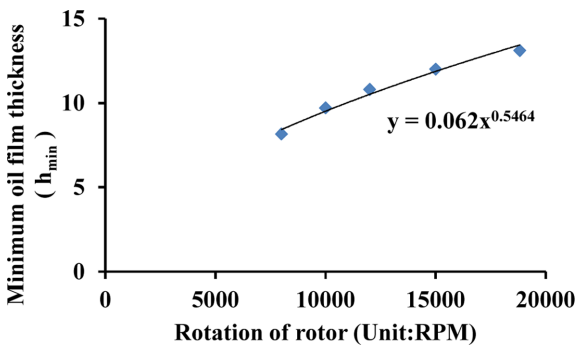


Fig. 3. Minimum oil film thickness w.r.t. the rotor rotating speed

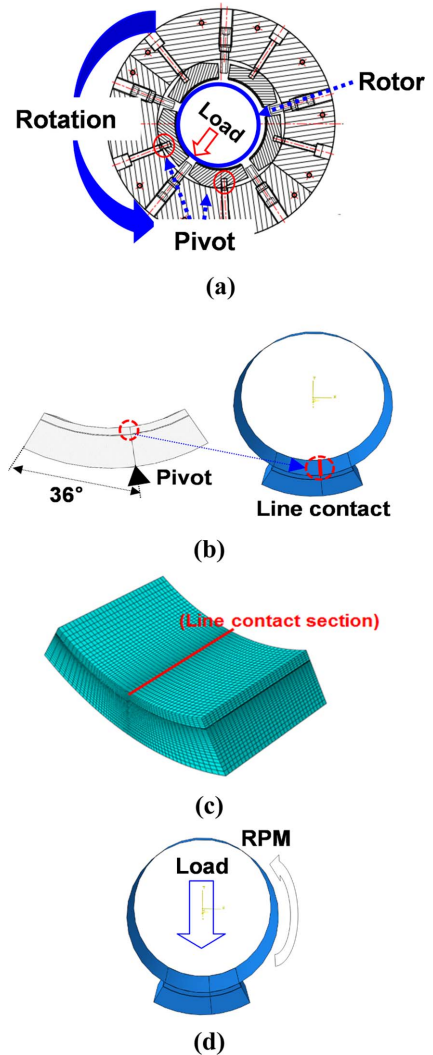


Fig. 4. Conditions for the finite element analysis; (a) LBP contact, (b) Modeling, (c) Mesh, (d) Load, RPM

주축에 의해 패드에 가해지는 하중은 Pivot 위치에 집중되고 좌우 대칭적으로 선 접촉하게 된다. 본 연구에서는 대칭성을 고려하여 Fig. 4(b)와 같이 36° 위치의 Pivot에 주축과 패드가 선 접촉할 수 있도록 모델링하였고, 실제 베어링 사이즈를 고려하여 복합재료 라이너를 3 mm, 접촉층을 0.2 mm로 모델링하였다. 또한 주축은 강체(Rigid body)로 가정하였다. Fig. 4(c)와 같이 C3D8R(8-node linear brick, reduced integration, hourglass control) 요소를 이용하여 베어링 구조의 Mesh를 나누었고, 이 때 선 접촉하는 부분에 가까워질수록 Mesh를 조밀하게 나누어 해석 결과의 신뢰도를 향상시켰다. Fig. 4(d)와 같이 주축의 회전 속도는 유한 차분법으로 부터 계산된 2596 RPM이며, 주축으로부터 베어링에 가해지는 하중은 3.6 kN이다. 이 때 주축과 베어링 사이의 마찰계수를 0.05부터 0.35까지 7 단계로 변화시켜 구조 해석을 진행하였다.

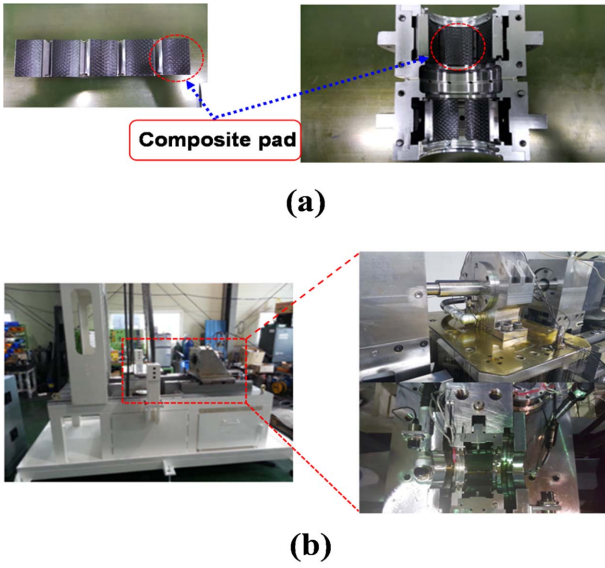


Fig. 5. Oil cut test; (a) Composite tilting pad journal bearing, (b) Test bench

2.3 오일 공급 중단 실험

해석 결과를 검증하기 위해 실제 베어링의 구동 조건을 모사한 테스트 벤치(Test bench)를 이용하여 복합재료 틸팅 패드 저널 베어링의 오일 공급 중단 실험을 진행하였다. Fig. 5(a)는 실험을 위해 제조된 복합재료 틸팅 패드 저널 베어링이며 Fig. 5(b)는 복합재료 틸팅 패드 저널 베어링이 장착된 테스트 벤치이다. 실험에 사용된 테스트 벤치는 최고 속도 52,000 RPM, 50 kW 용량의 동기 모터와 튜닝된 인버터 시스템을 활용하여 다양한 속도와 토크를 구현할 수 있게 설계되었다. 또한 하중 인가 장치를 활용하여 다양한 하중 조건에서 실험이 가능하다. 오일 공급 중단 실험의 초기 조건은 평균 3.6 kN의 하중과 18,000 RPM의 회전 속도이며, 오일 공급을 중단한 후 하중은 일정하게 유지하고 주축을 회전시키는 모터의 전원을 차단하여 베어링 내구성 실험을 진행하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 기계적 물성

Table 1은 본 연구에 사용된 탄소섬유/에폭시 복합재료의 물성 값들을 나타내며, 고온에서의 강도 값의 대부분은 상온 강도 값 대비 약 60% 정도를 유지하였다.

3.2 유한 요소 해석

틸팅 패드 저널 베어링에 발생하는 응력은 주축과 선 접촉하는 부위에 집중적으로 발생하기 때문에, 이러한 부위에 베어링의 Axial 방향으로 3가지 Path를 설정하고 마찰계수의 변화에 따른 베어링의 응력 분포를 구하였다. Fig. 6은

Table 1. Material properties of carbon/epoxy composite

	Temperature (°C)	Directions	Material properties
Compressive strength (MPa)	25	1	587
		2	967
		3	427
	150	1	427
		2	746
		3	861
Tensile strength (MPa)	25	1	31.2
		2	730
		3	24.2
	150	1	66.6
		2	7.60
		3	0.039
Elastic modulus (GPa)	25	ν_{12}	0.50
		ν_{13}	105
		ν_{23}	75.3
	150	S_{12}	93.1
		S_{13}	46.7
		S_{23}	6.2
Poisson's ratio	25	G_{12}	4.7
		G_{13}	76.0
		G_{23}	48.1
	150		
Shear strength (MPa)	25		
	150		
Shear modulus (GPa)	25		
	150		
ILSS (MPa)	25		
	150		

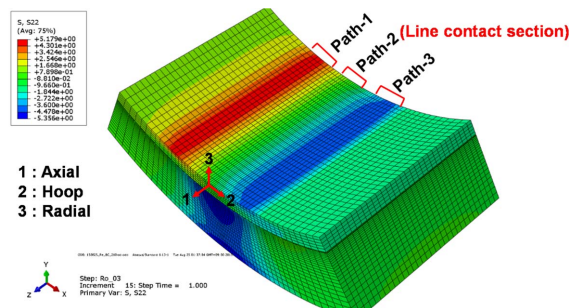


Fig. 6. FE analysis results

마찰계수 0.2일 때 틸팅 패드에 발생하는 Hoop 방향의 응력 분포를 나타내며, 응력이 집중적으로 발생하는 부위에 설정된 Path를 나타낸다. Path-1은 인장응력(Tensile stress)

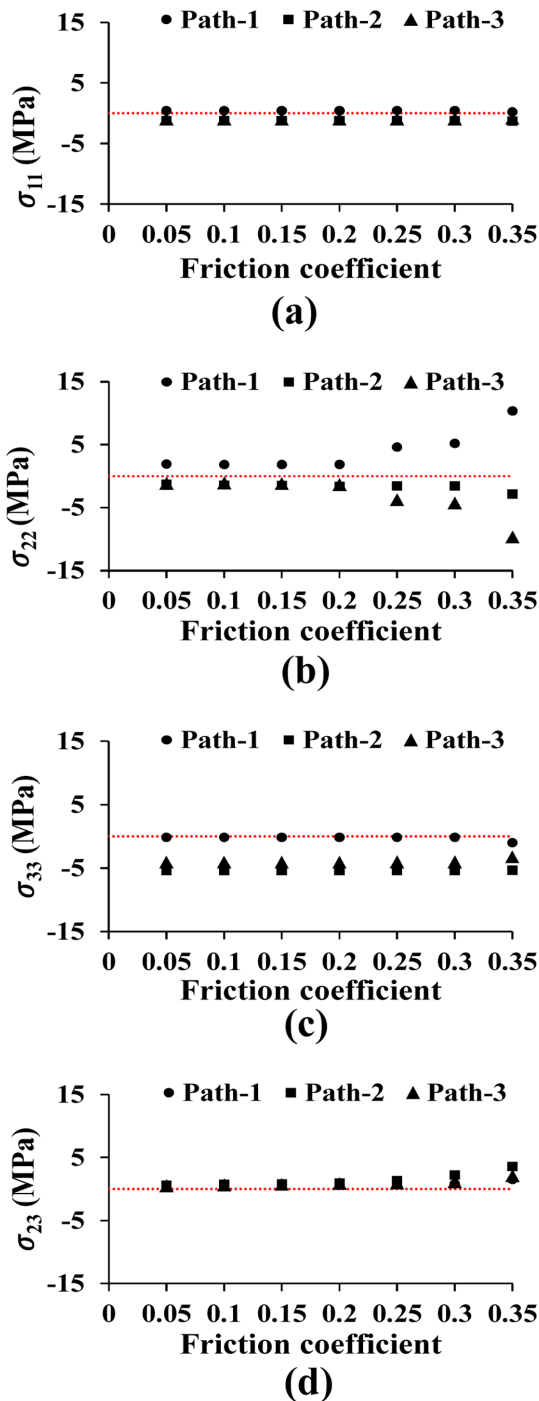


Fig. 7. Stress distributions of the composite tilting pad journal bearing w.r.t. the friction coefficients : (a) axial stress (σ_{11}), (b) hoop stress (σ_{22}), (c) radial stress (σ_{33}), (d) Shear stress (σ_{23})

이 집중 되는 부분, Path-2는 선 접촉 부분, 그리고 Path-3는 압축응력(Compressive stress)이 집중되는 부분이다.

Fig. 7에는 각 Path에서 발생하는 최대 응력을 도출하여 마찰계수에 따라 도시하였다. Fig. 7(a)의 Axial 방향 응력은 모든 Path에 대해 마찰계수에 따라 거의 변하지 않고 일정

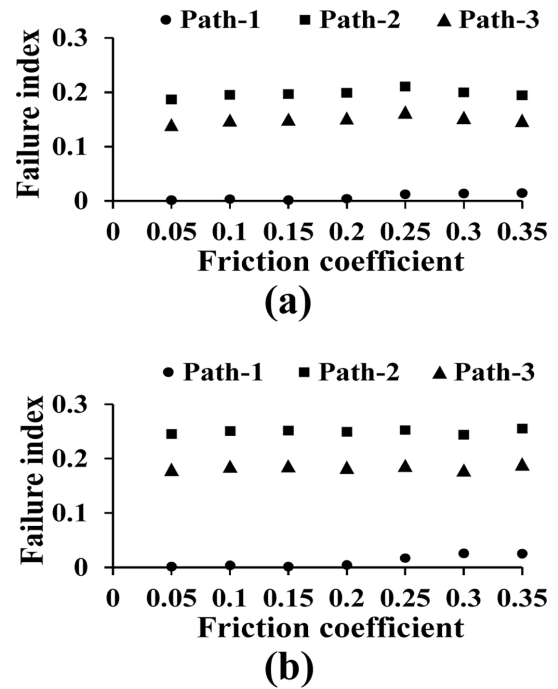


Fig. 8. Tsai-Wu failure indices w.r.t. the friction coefficients : (a) failure indices calculated with material strength at 25°C, (b) failure indices calculated with material strength at 150°C

하며, 응력의 크기 또한 다른 방향의 응력에 비해 매우 작다. 이는 Axial 방향 응력이 주로 Radial 방향의 베어링 하중에 의한 푸아송 효과 (Poisson's effect)에 의해 발생하기 때문이다. Fig. 7(c)의 Radial 방향 응력 역시 마찰계수에 관계없이 거의 일정한 값을 보이는데, 이는 Radial 방향으로 일정한 하중이 가해지기 때문이다. 반면, Fig. 7(b)의 Hoop 방향 응력은 주축에 의해 가해지는 토크의 방향과 일치하기 때문에 다른 방향에 비해 매우 큰 값을 나타내었고, 마찰계수에 따라 증가하는 경향을 보였다. 이는 주축에 의한 토크가 마찰 계수가 커짐에 따라 증가하기 때문이다. 특히 Hoop 방향 응력은 마찰계수 0.25 이후부터 3가지의 Path 모두에서 급격한 증가를 보였다. 또한, Fig. 7(d)에 나타난 베어링 표면에 가해지는 최대 전단응력은 상온 및 고온의 중간전단강도 값보다 각각 약 95%, 92% 정도 낮다.

해석 결과 얻어진 최대 응력 값들과 실험으로부터 얻어진 강도 값을 이용하여 Tsai-Wu failure index를 계산하였고, Fig. 8의 (a), (b)는 각각 상온과 고온에서의 강도 값을 이용하여 계산된 Path에 따른 Failure index를 나타낸다. 계산 결과 온도에 따른 물성 값의 변화에 상관없이 Failure index가 1을 넘지 않았으며, 고온에 비해 상온 강도 값을 이용하여 계산하였을 때 소폭 증가된 결과를 보였다. 또한 Path-2의 Failure index 값이 다른 Path 대비 상대적으로 높은 값을 나타내었고, 이는 Path-2에서 직접적인 선 접촉으로 인한 매우 큰 응력이 발생하였기 때문이다.

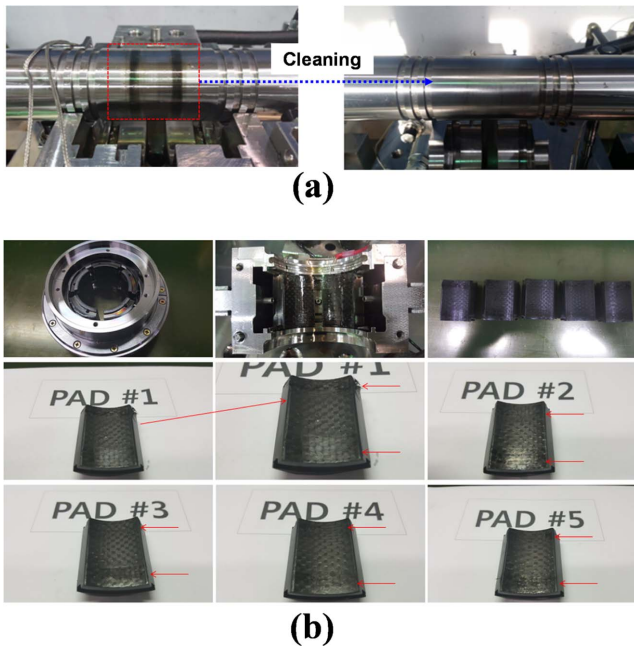


Fig. 9. Oil cut test results : (a) rotor surface, (b) composite liner surface

3.3 오일 공급 중단 실험

Fig. 9(a)에는 오일 공급 중단 시험 후 주축의 표면을 나타내었다. 복합재료 틸팅 패드 저널 베어링은 화이트 메탈 베어링과 달리 주축에 용착에 의한 합금화가 발생 하지 않고 일부 복합재료 성분이 주축 표면에 전이 되었지만 부드러운 사포를 사용하여 손쉽게 제거가 가능했다. 또한 시험 전·후 주축의 직경 치수 편차가 $2\ \mu\text{m}$ 이내로 거의 차이가 없을 정도로 주축의 손상은 발견되지 않았다. Fig. 9(b)는 시험 후 복합재료 패드의 표면을 나타내며, 적색 화살표로 표시된 부분에서 가벼운 표면 마모 현상 및 국부적 층간 박리(Delamination) 현상이 관찰되었다. 이는 마찰력에 의한 주축의 진동 발생으로 패드의 양 끝 단에 응력이 집중되어 나타난 결과로 판단된다. 추후에는 보다 정확한 내구성 예측을 위해 이러한 주축의 진동을 고려한 구조 해석을 수행할 예정이다.

4. 결 론

본 논문에서는 탄소섬유/에폭시 복합재료의 기계적 물성을 측정하였다. 상온뿐만 아니라 오일 공급 중단 상황에서의 고온 환경에서도 물성 실험을 진행하였다. 또한 복합재료의 층간전단 강도를 측정하기 위해 SBS 실험을 진행하였다. 이를 토대로 오일 공급 중단 상황과 유사한 조건 하에서 유한 요소 해석을 진행하였다. 오일 공급 중단 상황에서 복합재료 틸팅 패드 저널 베어링의 파손 가능성을 알아 보기 위해 Tsai-Wu failure index를 계산하였으며, 이를 검증하기 위해 내구성 시험을 진행하여 아래와 같은 결론을 얻었다.

1. 탄소섬유/에폭시 복합재료의 인장, 압축, 전단 강도 값과 층간전단강도 값이 상온에 비해 150°C 에서 40% 감소하였다.

2. 탄소섬유/에폭시 복합재료 틸팅 패드 저널 베어링의 Failure index는 온도에 따른 강도 값의 변화에 상관없이 모든 마찰계수 범위에 대해 1을 넘지 않았다.

3. 오일 공급 중단 실험 결과 탄소섬유/에폭시 틸팅 패드 저널 베어링 및 주축에는 심각한 손상이 발견되지 않았다.

본 연구 결과로부터 탄소섬유/에폭시 복합재료 틸팅 패드 베어링의 높은 내구성을 확인하였고, 기존의 화이트 메탈 베어링을 대체하여 오일 공급 중단이 발생했을 경우에도 터보/컴프레서 시스템의 안정성을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 교육부와 한국연구재단의 지역혁신인력양성사업(2015H1C1A1035930), 산업통상자원부와 한국산업기술평가관리원의 섬유생활스트림사업(10051606) 및 2014년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단 기초연구사업(2014R1A1A1A05003672)의 지원으로 수행되었습니다. 지원에 대해 진심으로 감사드립니다.

REFERENCES

- Mouritz, A.P., and Gibson, A.G., *Fire Properties of Polymer Composite Materials*, Springer, 2007.
- Bosze, E.J., Alawar, A., Bertschger, O., Tsai, Yun, I., and Nutt, S.R., "High Temperature Strength and Storage Modulus in Unidirectional Hybrid Composites," *Composites Science and Technology*, Vol. 66, No. 13, 2006, pp. 1963-1969.
- Gu, P., and Asaro, R.J., "Structural Buckling of Polymer Matrix Composites due to Reduced Stiffness from Fire Damage," *Composite Structures*, Vol. 69, No. 1, 2005, pp. 65-75.
- Lee, D.G., and Kim, S.S., "Failure Analysis of Asbestos-phenolic Composite Journal Bearing," *Composite Structures*, Vol. 65, No. 1, 2004, pp. 37-46.
- Yu, H.N., Kim, S.S., and Lee, D.G., "Optimum Design of Aramid-phenolic Composite Journal Bearing," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 40, No. 8, 2009, pp. 1186-1191.
- Kim, S.S., and Lee, D.G., "Design of the Hybrid Composite Journal Bearing Assembled by Interference Fit," *Composite Structures*, Vol. 75, No. 1-4, 2006, pp. 222-230.
- Choe, K.Y., On, S.Y., Song, S.A., Lim, J.W., You, J.I., and Kim, S.S., "Study of the Endurance Performance of Composite Journal Bearings under the Oil Cut Situation," *Composite Structures*, Vol. 134, 2015, pp. 772-781.
- Hamrock, B.J., *Fundamentals of Fluid Film Lubrication*, 2nd ed, New York:Marcel Dekker Inc., 2004.