

論文

하이브리드 복합재 플라이휠 로터에 작용하는 내압의 효과

하성규*, 오제훈*, 한상철**, 김명훈***

Effects of the Inner Pressure on a Hybrid Composite Flywheel Rotor

Sung Kyu Ha*, Je-Hoon Oh*, Sang-Chul Han**, Myung-Hoon Kim***

ABSTRACT

The delamination in the filament-wound composite flywheel rotor often lowers the performance of the flywheel energy storage system. A conventional ring type hub usually causes tensile stresses on the inner surface of the composite rotor, resulting in lowering the maximum rotational speed of the rotor. In this work, the stress and strain distributions within a hybrid composite rotor were derived from the two-dimensional governing equation with the specified boundary conditions, and an optimum pressure at the inner surface of the rotor was proposed to minimize the strength ratio and maximize the storage energy. A split type hub was introduced to apply the calculated optimum pressure at the inner surface, and a spin test was performed up to 40,000 rpm to demonstrate the performance of the split type hub with radial and circumferential strains measured using a wireless telemetry system. From the analysis and the test, it was found that the split type hub successfully generates a compressive pressure on the inner surface of the rotor, which can enhance the performance of the composite rotor by lowering the strength ratio within the rotor.

초 록

필라멘트 와인딩 공정으로 제작된 고속 회전용 복합재 플라이휠 로터는 층간분리 현상에 의해 에너지 저장용량이 저하된다. 그리고 기존의 링 타입 허브는 복합재 로터 내측면에 인장력을 가하게 되고, 이는 로터내의 반경방향 인장응력을 가중시켜 로터의 한계 회전수를 저하시킨다. 복합재 로터의 응력해석을 위해서 2차원 평형방정식과 경계조건이 사용되었고, 이를 근거로 강도비를 최소화시키는 최적의 내압이 존재함을 수치적으로 제시하였다. 이러한 최적의 내압을 발생시키기 위해서 원주방향으로 분할된 스플릿 타입 허브를 제안하고, 링 타입과 스플릿 타입 허브의 두께변화에 따른 내압분포의 영향을 제시하였다. 스플릿 타입 허브의 유효성을 검증하기 위해 허브를 포함한 복합재 로터를 제작한 다음, 최대 회전수 40,000rpm까지 파손 없이 스핀 테스트를 수행하였다. 동시에 로터 표면에 4개의 원주방향 및 반경방향 스트레인게이지를 부착하여 변형률을 무선으로 측정하였다. 측정된 변형률은 해석결과와 매우 잘 일치하였다. 특히 반경방향의 응력을 크게 낮출 수 있었고, 반경방향으로 모두 압축 변형률이 발생함을 확인하였다. 결국 스플릿 타입 허브는 플라이휠 로터의 단점인 반경방향의 낮은 강도를 보완하는 효과를 나타내어, 저장에너지 밀도를 증가시킴으로써 대형 고출력 플라이휠 에너지 저장 시스템의 개발 가능성을 제시하였다.

Key Words: 하이브리드 복합재 플라이휠 로터(hybrid composite flywheel rotor), 내압(inner pressure), 스핀 테스트(spin test), 변형률 측정(strain measurement)

* 한양대학교 기계정보경영공학부, 교신저자(E-mail:sungha@hanyang.ac.kr)

** 한전 전력연구원 신기술센터

*** 한양대학교 대학원 기계설계학과

1. 서 론

플라이휠 에너지 저장 장치는 로터의 고속 회전에 의해 관성에너지를 저장하는 시스템이다. 마그네틱 베어링과 같은 비접촉, 저마찰 방식의 지지베어링에 의해서 부양되어 회전하는 플라이휠 로터 시스템은 로터, 축, 그리고 로터와 축을 연결하는 허브로 구성되어 있다[1]. 일반금속을 사용하는 기존의 플라이휠 로터는 고속 회전시 원심력에 의해 반경방향으로 큰 응력이 발생하며, 이는 로터의 에너지 저장용량을 제한하게 된다. 최근 고강도, 고강성 복합재료의 개발은 로터의 고속 회전을 가능하게 하였으며, 에너지 저장용량을 획기적으로 증가시켰다. 복합재료를 사용한 플라이휠 로터는 일반적으로 필라멘트 와인딩 공정(filament winding process)을 통해서 제작되며, 축 대칭 형태의 다층링 구조로서 원주방향과 반경방향으로 각각 다른 물성치 및 강도를 갖는 뚜렷한 직교 이방성 특성을 보인다. 이는 원주방향으로는 매우 강한 강도를 가지고 있지만, 반경방향으로는 섬유와 보강이 이루어지지 않아 강도가 취약해서, 회전시 발생하는 반경방향의 인장응력에 의해 쉽게 층간분리(delamination) 현상이 발생된다[2].

복합재 로터의 층간분리를 방지하기 위하여 로터의 반경방향 인장응력을 낮추는 것은 매우 중요하다. 이를 위하여 강성과 밀도가 각각 다른 두 가지 이상의 복합재료를 사용한 하이브리드 타입의 복합재 로터가 Ha 등[3-5]에 의해서 제시되었다. 내측에는 강성이 작고 무거운 복합재료를 외측에는 강성이 크고 가벼운 복합재료를 사용하여 회전시 내부에서 발생하는 반경방향 응력을 감소시켜 전체적인 강도의 향상을 가져왔다. 이러한 복합재 로터의 설계를 위해서 하이브리드 복합재 로터의 해석 방법을 제시하고, 로터의 최적설계를 위한 방법론이 연구되어졌다[6-10]. 또한 복합재 로터는 이방성에 의해 제작 공정과정에서 잔류응력이 발생하며, 이는 로터 내에서 반경방향으로 인장응력을 발생시켜 강도를 저하시키는 요소로 작용한다. 로터 내의 잔류응력을 실험적으로 측정하고, 그 잔류응력을 낮추는 연구가 진행되어 왔다[11-15].

로터를 축에 연결하는 허브는 일반적으로 솔리드 또는 링 타입이 있다. 하이브리드 복합재 로터는 단일 복합재 로터보다 내경에서 훨씬 많은 반경방향의 변위가 발생한다. 이는 상대적으로 강성이 강한 허브로부터 이탈을 유발시키게 되어, 하이브리드 복합재 로터의 기능을 살리지 못한다. 이러한 문제점을 극복하기 위해 기존의 링 타입 허브 대신에 반경방향의 팽창이 보다 쉽고 유연한 새로운 타입의 허브가 제시되어 지고 있다[16-19]. 여기서 허브의 기본적인 역할은 로터를 축에 고정시키면서, 복합재 로터 내경의 반경방향 변위보다 쉽게 변형할 수 있도록 제작하여

그 사이에서 인장응력이 발생하지 않게 하는 것이다. 궁극적으로 허브와 로터의 경계면에서 압축응력을 발생시키면서 허브와 로터의 이탈도 방지하며, 로터 내에서 발생하는 인장응력도 줄일 수 있다.

그리고 제작된 복합재 플라이휠 로터의 성능을 평가하고, 안전을 확인하기 위해 고속 스핀 테스트는 매우 중요하다. 스핀 테스트에서는 일반적으로 burst speed 만을 주로 측정하나, 로터 내에서 변형률 측정이 반드시 필요하다. 특히 허브가 로터 내측면에 압축력을 가할 때 로터에서 발생하는 변형률 측정을 통해서 층간분리의 유무를 판단할 수 있고, 응력분포를 예측할 수 있다. Herbst 등[18]은 금속재료의 원주형 허브와 복합재 로터를 고정시키기 위해서 그 사이에 유연한 구조의 복합재 아머(arbor)를 사용했으며, 이를 10MJ 급 플라이휠 에너지 저장 장치용 로터의 축소 모델(subscale model)에 적용하여 스핀 테스트를 수행하였다. 여기서는 레이저 센서를 사용하여 반경방향 변위(radial growth)를 측정한 다음 변형률을 예측하는 방법을 사용하였다. Zaitsev 등[20]은 몰딩(molding)에 의해서 제작된 플라이휠 로터와 와인딩(winding)에 의해 제작된 림 타입(rim-type) 플라이휠 로터에 대해서 각각 스핀 테스트를 수행하여, 고속 회전을 할 때 로터의 동적 거동, 최고 도달속도, 에너지 저장용량 등을 비교·분석하였다. 여기서는 electroensometric 방법을 사용하여 변형률을 직접 측정하고, 이로부터 응력을 계산하는 방법을 사용하였다. 이 밖의 플라이휠 로터의 스핀 테스트시 변형률을 측정하는 방법으로 광학적으로 변형률을 측정하는 방법인 광전자 변형률 측정(optoelectronic strain measurement)법, 그리고 스트레인 게이지와 슬립링을 사용하여 로터와 직접 접촉 함으로서 변형률을 측정하는 방법 등이 제안되어지고 있다[21]. 스핀 테스트로부터 측정된 이러한 변형률은 해석 결과와 비교·검토되어 해석 및 설계 기법을 확인하게 해준다. 그러나 고가의 스핀 테스트 장비와 테스트시 내포하고 있는 위험성 때문에 현재까지 플라이휠 로터의 스핀 테스트 및 변형률 측정 등 시험적 연구는 상대적으로 많이 이루어지지 못하고 있다.

본 연구에서는 이방성 재료로 만들어진 하이브리드 복합재 로터의 구조해석을 수행하여, 링 타입으로 가정된 허브의 영향을 살펴본다. 허브의 최적 선정을 위해 허브와 로터 사이에서 발생하는 인장력과 압축력의 영향을 살펴보고, 압축력을 가하는 허브가 기존의 하이브리드 복합재 로터의 성능을 어떻게 높일 수 있는가를 검토하고자 한다. 또한, 이러한 압축력을 발생시키기 위해서 원주방향으로 분할된 스플릿 타입 허브의 영향을 조사하였다. 스플릿 타입 허브와 하이브리드 복합재 로터를 제작한 다음, 스핀 테스트를 수행하고, 동시에 변형률 데이터를 무선으로 획득하여 해석의 정확성과 허브의 기능을 검토하고자 한다.

2. 응력해석

본 연구에서 응력해석을 위한 플라이휠 로터는 Fig. 1과 같이 복합재가 반경방향으로 두겹씩 적층된 축대칭 형태의 다층링 구조로서, 축방향으로 형상이 일정하여 응력변화는 무시할 수 있을 정도로 작기 때문에 축방향의 응력상태가 일정하다고 간주하였다. 2차원 평형방정식과 경계조건을 사용하여 응력해석을 수행하였으며, 축대칭에 따른 원주방향의 변위는 무시하였고 반경방향의 변위만을 고려하였다.

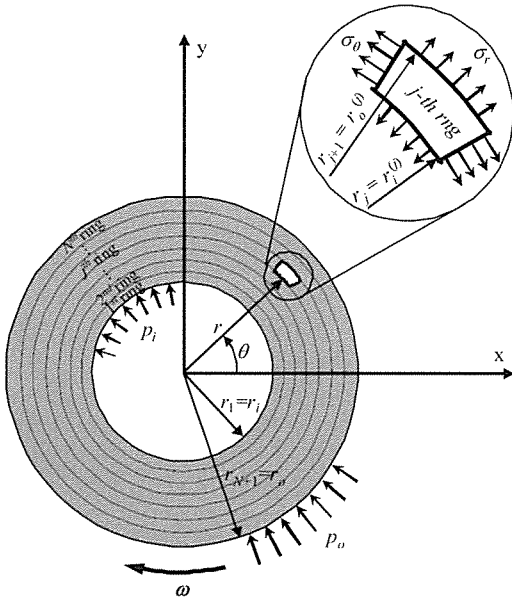


Fig. 1 Geometrical definitions for stress analysis of a composite flywheel rotor.

회전시 각 링에서 변형률과 응력은 지배방정식을 풀어 변위를 계산하였으며, 원통형 좌표계에서 로터의 지배방정식은 다음과 같다[5].

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} + \rho r \omega^2 = 0 \quad (1)$$

여기서 σ_θ 와 σ_r 는 각각 원주방향, 반경방향의 응력을 의미하며, 그리고 ρ , r , ω 는 각각 밀도, 반경, 회전속도를 나타낸다. 원통형 좌표계에서 응력과 변형률의 관계는 다음과 같다.

$$\begin{pmatrix} \sigma_\theta \\ \sigma_r \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} \\ Q_{21} & Q_{22} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_\theta \\ \varepsilon_r \end{pmatrix} \quad (2)$$

그리고 탄성계수 벡터는 다음과 같이 정의되어 진다.

$$\begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} \\ Q_{21} & Q_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E_\theta & -\nu_{\theta r}/E_r \\ -\nu_{\theta r}/E_r & 1/E_r \end{bmatrix} \quad (3)$$

식 (3)에서 E_θ 와 E_r 는 각각 원주방향과 반경방향의 탄성계수, $\nu_{\theta r}$ 은 포아송비를 나타낸다. 축 대칭 평면 변형률 상태에서 원주방향 변형률 ε_θ 과 반경방향 변형률 ε_r 는 반경방향 변위 u_r 로 다음과 같이 표현된다.

$$\varepsilon = \begin{pmatrix} \varepsilon_\theta \\ \varepsilon_r \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{u_r}{r} \\ \frac{\partial u_r}{\partial r} \end{pmatrix} \quad (4)$$

식 (2)와 식 (4)를 식(1)에 대입하여 반경방향 변위 u_r 에 대해 구하면 다음과 같다.

$$u_r = \frac{-\rho\omega^2}{(9-\kappa^2)Q_{22}}r^3 + \frac{C_1}{Q_{12}+\kappa Q_{22}}r^\kappa + \frac{C_2}{Q_{12}-\kappa Q_{22}}r^{-\kappa} \quad (5)$$

식 (5)에서 C_1 과 C_2 는 경계조건에 의해 결정되는 상수이며, κ 는 물성치에 의해서 다음의 식 (6)과 같이 정의된다.

$$\kappa = \sqrt{\frac{Q_{11}}{Q_{22}}} \quad (6)$$

식 (5)를 식 (4)와 식 (2)에 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$\varepsilon_r = \frac{-3\rho\omega^2}{(9-\kappa^2)Q_{22}}r^2 + \frac{\kappa C_1}{Q_{12}+\kappa Q_{22}}r^{\kappa-1} - \frac{\kappa C_2}{Q_{12}-\kappa Q_{22}}r^{-\kappa-1} \quad (7)$$

$$\sigma_r = \frac{-\rho\omega^2(Q_{12}+3Q_{22})}{(9-\kappa^2)Q_{22}}r^2 + C_1r^{\kappa-1} + C_2r^{-\kappa-1} \quad (8)$$

식 (1)에서 식 (8)까지 임의의 어떤 링에나 적용되며, 인접한 각 링(예를 들면, j 와 $j+1$ 번째 링)에서 힘의 적합조건과 변위의 적합조건이 다음과 같이 만족 되어야 한다.

$$\sigma_r^{(j+1)} = \sigma_r^{(j)} \quad (j=1, 2, 3, \dots, N-1) \quad (9)$$

$$u_r^{(j+1)} = u_r^{(j)} \quad (j=1, 2, 3, \dots, N-1) \quad (10)$$

복합재 로터의 변위 u_r 를 계산하기 위해 필요한 경계조건은 로터의 내측면과 바깥면에 주어지는 압력 항으로서, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma_r = -p_i \quad \text{at} \quad r = r_i \quad (11a)$$

$$\sigma_r = -p_o \quad \text{at} \quad r = r_o \quad (11b)$$

여기서 p_i 와 p_o 는 로터의 내경 r_i 와 외경 r_o 에 작용하는 압력을 각각 의미한다.

복합재 로터 안전성 유무에 대한 평가는 원주방향과 반경방향의 강도비, 그리고 Tsai-Wu 파손이론으로 계산된 강도비 모두를 사용함으로써 좀 더 보수적인 파손기준을 적용하였다. 원주방향 강도비와 반경방향 강도비 D_θ , D_r 는 각 방향의 응력성분을 인장강도 또는 압축강도로 나눈 값으로 정의되며, 다음과 같이 표시된다.

$$\sigma_r = -p_o \quad \text{at} \quad r = r_o \quad (12)$$

여기서 원주방향의 강도비를 계산할 경우 k 는 θ 를, X_k 와 X'_k 는 원주방향의 인장강도 X 와 압축강도 X' 를 의미하며, 반경방향의 강도비를 계산할 경우 k 는 r 를, X_k 와 X'_k 는 원주방향의 인장강도 Y 와 압축강도 Y' 를 의미한다. 그리고 다음과 같은 2차 Tsai-Wu 파손기준에 의해 강도비 R 는 계산된다.

$$\sigma^T \bar{\mathbf{F}} \sigma + \bar{\mathbf{F}} \sigma R - R^2 = 0 \quad (13)$$

여기서 $\bar{\mathbf{F}}$ 는 재료의 강도변수로서 다음과 같이 정의된다.

$$\bar{\mathbf{F}} = \begin{bmatrix} \frac{1}{XX'} & -\frac{1}{2} \sqrt{\frac{1}{XX'} \frac{1}{YY'}} \\ -\frac{1}{2} \sqrt{\frac{1}{XX'} \frac{1}{YY'}} & \frac{1}{YY'} \end{bmatrix} \quad (14a)$$

$$\bar{\mathbf{F}} = \left[\frac{1}{X} - \frac{1}{X'} \quad \frac{1}{Y} - \frac{1}{Y'} \right] \quad (14b)$$

위에서 정의된 강도비 D_θ 와 D_r , 그리고 Tsai-Wu R 의 최대값이 1보다 크면 재료의 파손을 의미하며, 그보다 작으면 안전함을 의미한다.

3. 내압의 효과

플라이휠 로터의 성능에서 중요하게 고려할 사항은 로터의 저장에너지이다. 로터가 ω 의 속도로 회전할 경우 저장되는 에너지 E 는 로터 내부에서 발생하는 강도비중 최대값이 1일 때의 운동에너지로 다음과 같이 정의된다.

$$E = \frac{1}{2} I \omega^2 \quad \text{at} \quad \max.(D_\theta, D_r, \text{Tsai-Wu } R)=1 \quad (15)$$

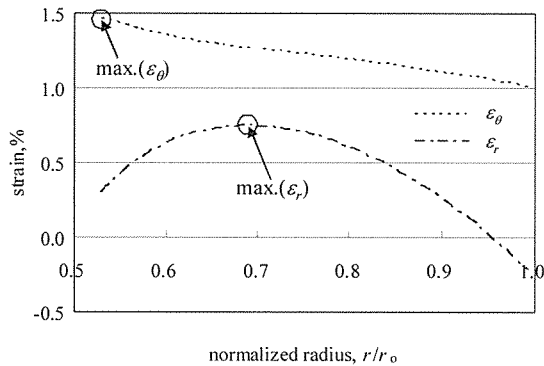
여기서 I 는 질량관성모멘트를 의미한다. 식 (15)를 사용하여 내압에 따른 로터의 에너지 저장용량의 변화를 계산할 수 있다.

현재 플라이휠 로터를 회전축에 고정시키는 방식으로 주로 링 타입 허브가 사용되고 있다. 링 타입 허브가 로터의 성능에 미치는 영향을 분석하기 위해서 위에서 제시한 해석적 이론을 바탕으로 로터의 응력해석을 수행하였다. 일정한 두께의 허브를 포함한 로터를 단일재료를 사용한 복합재 로터와 2가지 재료를 사용한 하이브리드 타입 복합재 로터로 구분하여 40,000rpm으로 회전할 때 변형률과 응력 분포를 계산하였다. 여기서 단일 링 복합재 로터는 내경 180mm, 외경 340mm, 높이 138mm의 E-glass/Epoxy 복합재료를 사용했다. 그리고 하이브리드 복합재 로터는 전체적인 내경, 외경, 그리고 두께는 단일 링 복합재 로터와 같은 치수를 사용하였으며, 내측 림에는 두께 34mm의 E-glass/Epoxy 복합재료를, 외측 림에는 두께 46mm의 T700/Epoxy 복합재료를 사용하였다. 여기서 필요한 E-glass/Epoxy와 T700/Epoxy의 물성치는 Table 1에 나타내었다. 또한 링 타입 허브는 두께 3mm의 알루미늄합금을 사용하였으며, 탄성계수 68.9GPa, 포아송비 0.3, 그리고 밀도 2600kg/m³의 물성치를 갖는다.

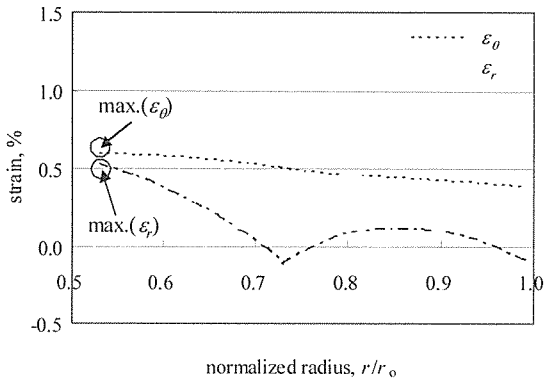
해석을 수행한 결과 반경비 r/r_o 에 따른 원주방향과 반경방향의 변형률 분포를 Fig. 2에 나타내었다. 단일 링 복합재 로터에서 원주방향 변형률의 최대값은 로터 내측면에서, 반경

Table 1 Material properties of the composite rotor

Property	Symbol	E-Glass/Epoxy	T700/Epoxy	Unit
Circumfer. modulus	E_θ	38.6	138	GPa
Radial modulus	E_r	8.27	9	GPa
Circumfer.-radial Poisson's ratio	$\nu_{\theta r}$	0.28	0.3	-
Density	ρ	1800	1600	kg/m ³
Circumfer. tensile strength	X	1062	2940	MPa
Circumfer. compressive strength	X'	610	1600	MPa
Radial tensile strength	Y	25	25	MPa
Radial compressive strength	Y'	118	168	MPa



(a) single rim composite rotor

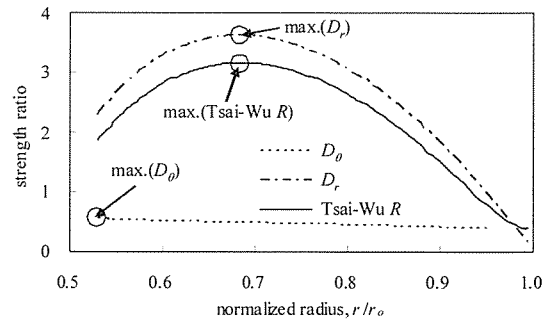


(b) hybrid composite rotor (double rims)

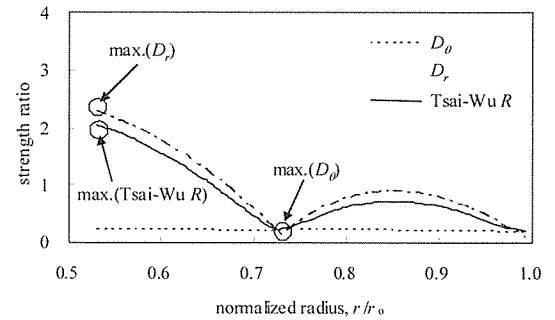
Fig. 2 Strain distributions within a rotor at 40,000 rpm.

방향 변형률의 최대값은 로터 내부에서 발생함을 보여주고 있다. 반면에 하이브리드 복합재 로터에서는 원주방향 및 반경방향 변형률 모두 로터 내측면에서 발생한다. 특히 로터의 내부와 내측면에서 반경방향으로 인장변형이 발생하고 있음을 보여주고 있으며, 과도한 인장변형은 복합재 로터의 층간 분리 현상을 초래할 수 있다. 그리고 허브와 접하고 있는 내측면에서 반경방향 변위는 하이브리드 복합재 로터가 단일 림 복합재 로터보다 더 크게 발생함을 알 수 있으며, 이는 하이브리드 복합재를 사용할 경우 로터와 허브의 이탈을 더 쉽게 유발시킬 수 있다는 것을 보여주고 있다.

로터 내부에서 발생하는 응력 및 강도비 분포를 살펴보기 위해서 반경비 r/r_o 에 따라서 원주방향 강도비 D_θ , 반경방향 강도비 D_r , 그리고 Tsai-Wu 파손 이론을 사용한 강도비 R 를 각각 계산하여 Fig. 3에 나타내었다. 단일 림 복합재 로터에서는 반경방향의 인장응력이 로터 내부에서 최대 로 발생하며, 하이브리드 복합재 로터에서는 내측면에서 최대 로 발생하는 것을 보여주고 있다. 그리고 하이브리드 복합재 로터를 사용할 경우 단일 림 복합재 로터에 비해



(a) single rim composite rotor

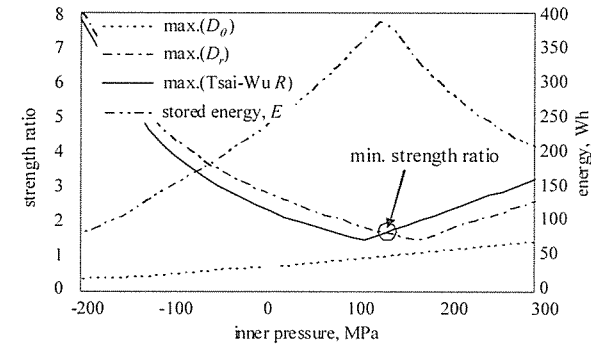


(b) hybrid composite rotor (double rims)

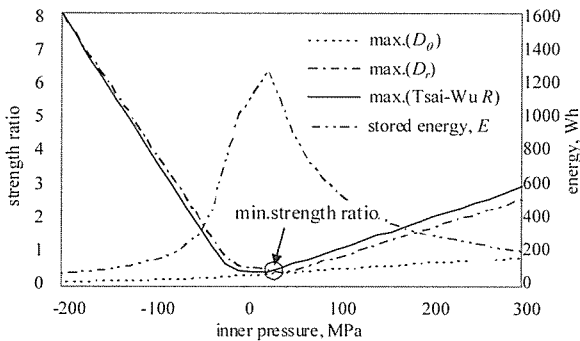
Fig. 3 Stress distributions within a rotor at 40,000 rpm.

반경방향의 인장응력을 낮출 수 있다는 사실을 확인할 수 있다. 그러나 단일 림 복합재 로터와 하이브리드 복합재 로터 모두 로터의 내측면에서 반경방향으로 인장응력이 발생하며, 이는 링 타입 허브의 반경방향 강성이 복합재로 보다 훨씬 크기 때문에 회전시 허브와 로터 사이에서 인장력을 발생시키는 것으로 유추할 수 있다. 결국 링 타입 허브는 로터의 내측면에 인장력의 형태로 압력을 가하며, 원심력으로 인하여 로터 내부에 발생하는 반경방향 인장응력을 가중시킴으로써 로터의 한계 회전수를 낮추는 효과를 나타낼 수 있다. 위의 결과로부터 링 타입 허브는 로터의 내측면에 인장력을 가한다는 사실을 알 수 있으며, 이는 로터의 성능을 저하시키는 역할을 하게 된다. 반면에 내측면에 작용하는 적당한 압축력은 로터의 성능을 향상시킬 것으로 예측할 수 있다.

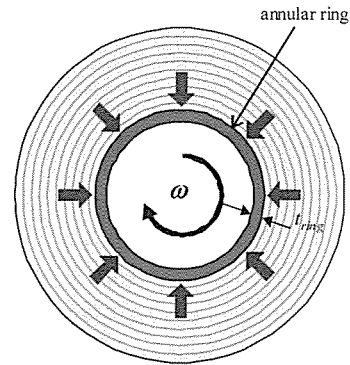
한편 로터에서 발생한 최대 강도비를 최소화시키기 위한 내압을 구하기 위해서 내압에 따른 최대 강도비의 변화를 계산하였다. 내압의 변화에 따른 원주방향의 최대 강도비 $\max.(D_\theta)$ 와 반경방향의 최대 강도비 $\max.(D_r)$, 그리고 Tsai-Wu 파손이론으로 계산한 최대 강도비 $\max.(Tsai-Wu R)$ 와 함께 로터의 저장에너지 E 를 각각 계산하여 Fig. 4에 나타내었다. 여기서 저장에너지는 로터에서 발생하는 최대강도비가 1을



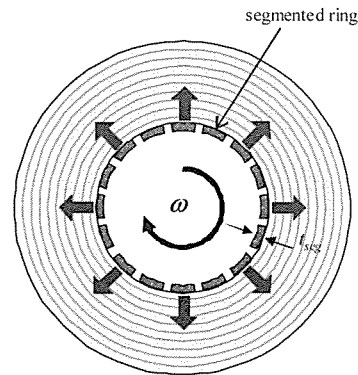
(a) single rim composite rotor



(b) hybrid composite rotor (double rims)

Fig. 4 Maximum stresses and strength ratios due to inner pressure at r_i .

(a) negative pressure by a ring type hub



(b) positive pressure by a split type hub

Fig. 5 Schematics of hubs in a rotor.

넘지 않는 한도 내에서 최대 회전속도를 계산한 다음, 이를 식(15)의 로터 회전속도와 저장에너지의 관계식에 대입하여 계산하였다. 그리고 로터에서 발생하는 최대 강도비를 최소화시키고, 동시에 저장에너지를 최대화시키는 최적의 내압을 제시하였다. 여기서 최대 강도비 분포의 기울기가 바뀌는데, 이는 내압의 변화에 따른 최대 강도비를 계산할 때 강도비 최대값의 지점이 로터 내측면과 로터 내부 사이에서 서로 바뀌기 때문이다. Fig. 4에서와 같이 단일 림 복합재 로터에서 최적의 내압은 130MPa, 최대 저장에너지는 385Wh이며, 하이브리드 복합재 로터에서 최적의 내압은 27MPa, 최대 저장에너지는 1278Wh를 보이고 있다.

로터가 회전할 때 내측면에 압축력이 발생하도록 하기 위해서 원주방향으로 분할된 타입의 허브가 효과적이다. 본 연구에서는 원주방향으로 균일하게 분할 되도록 하기 위해서 축방향으로 일정한 간격의 슬릿을 가지고 있는 스플릿 타입의 허브를 제안한다. 이러한 스플릿 타입 허브는 회전시 원심력으로 인하여 반경방향으로 쉽게 펼쳐질 수 있는 유연성을 가지고 있으며, 로터 내측면에 압축력을 가할 수 있는 구조로 되어 있다. 아울러 로터가 회전할 경우 복합재 림과

축을 확고히 고정시키는 역할도 함께 한다. 기존의 허브로 사용되고 있는 링 타입 허브와 스플릿 타입 허브의 개략도를 Fig. 5에 도시하였다. 여기서 링 타입 허브가 로터의 내측면에 가하는 압력은 앞에서 제시한 바와 같이 해석적 이론을 사용하여 계산하였으며, 스플릿 타입 허브가 로터의 내측면에 가하는 압력은 분할된 각각의 허브 링 부분이 회전에 의해서 발생하게 되는 원심력으로 계산하였다.

각 허브의 두께변화에 따른 내압분포의 효과를 살펴보기 위하여 로터가 40,000rpm에서 회전할 경우 링 타입 허브의 두께 t_{ring} 와 스플릿 타입 허브의 두께 t_{seg} 의 변화에 대한 내측면의 압력분포를 계산하여 Fig. 6에 나타내었다. 링 타입 허브에서 두께가 커질수록 내측면에 가해지는 인장력도 함께 증가하게 되며, 스플릿 타입 허브에서는 두께가 커질수록 압축력이 증가하게 된다. Fig. 6에 제시한 바와 같이 로터가 40,000rpm으로 회전할 경우 단일 복합재 로터에서 내압 130MPa를 발생시키기 위해서 필요한 스플릿 타입 허브의 두께는 17.3mm이며, 하이브리드 복합재 로터에서 내압 27MPa를 발생시키기 위해서 6.8mm의 허브 두께가 필요함을 알 수 있다. 이러한 정량적 수치는 스플릿 타입 허브 설계 및 제작시 활용될 수 있다.

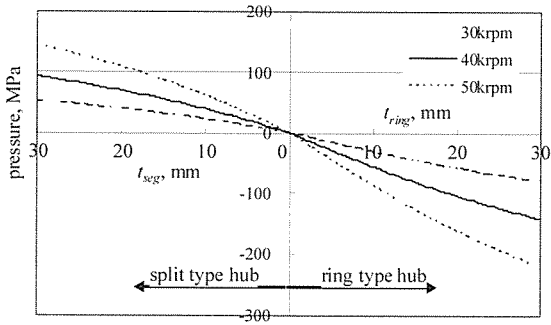


Fig. 6 Inner pressure generated by the hub.

4. 스피 테스트

스플릿 타입 허브를 채택한 복합재 플라이휠 로터의 성능을 실험적으로 확인하기 위해서 고속 스피 테스트가 수행되었다. 이를 위해서 필라멘트 와인딩 공정을 이용하여 안쪽에는 직경 248mm의 E-glass/Epoxy를, 바깥쪽에는 직경 340mm의 T700/Epoxy를 사용한 높이 138mm의 하이브리드 복합재 로터를 제작하였다. 그리고 직경 180mm, 높이 140mm의 스피 테스트 타입 허브와 직경 60mm, 길이 330mm의 축을 정밀 가공한 다음, 억지끼워맞춤(interference fitting) 방법을 사용하여 허브와 축, 그리고 복합재 로터를 조립하였다. 특히 복합재 로터와 축을 연결하는 스피 테스트 타입 허브는 회전시 원심력에 의해 반경방향으로 쉽게 펼쳐질 수 있도록 슬릿(slot)을 가진 구조의 분할된 링(segment ring)부분과 축과 접하는 슬리브(sleeve) 부분, 분할된 링 부분과 슬리브를 연결하면서 분할된 링이 유연하게 팽창할 수 있도록 하는 암(arm) 부분으로 구성되어 있다. 여기서 복합재 로터 허브의 분할된 링은 최적의 내압을 발생시키는 6.8mm의 두께로 제작하였다.

로터의 스피 테스트에 사용된 장비는 SCHENCK 사에서 제작된 BISU spin-test system으로서 DC모터에 의해서 구동되며, 유성치차를 이용한 고속 증속기를 탑재하여 최고속도 65,000rpm까지 로터를 회전시킬 수 있다. 플라이휠 로터와 연결된 구동 스피들(drive spindle)은 직경 12mm의 초유연축을 채택하여 고속 회전시 로터의 질량 불평형(unbalance)에 의해 발생된 지지베어링부의 문제점을 최소화시키고, 위험 속도(critical speed)에서 불균형 응답을 효과적으로 감쇄시키도록 설계되었다. 그리고 변위 센서의 의해서 구동 스피들의 반경방향 진동량이 모니터링 되며, 과도한 진동량이 감지되면 자동으로 감속시키도록 설정되어 있다[22].

스피 테스트시 로터 내의 변형을 측정을 통해서 스피 테스트 타입 허브의 유효성이 확인된다. 본 연구에서는 고속 회전체에 부착된 스트레인게이지로부터 측정된 변형률 데이터를

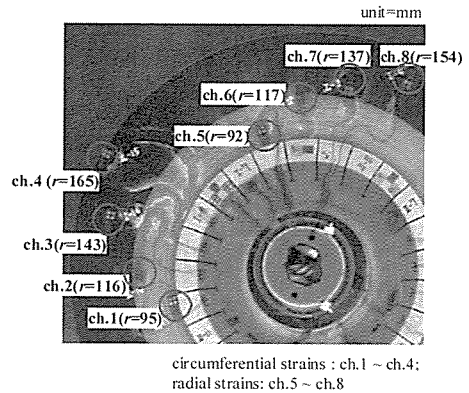


Fig. 7 Channel numbers and locations for strain measurement.

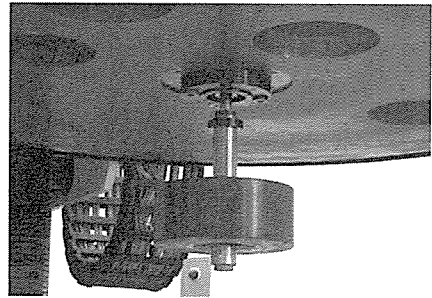


Fig. 8 Spin test set up in the BISU spin-test system.

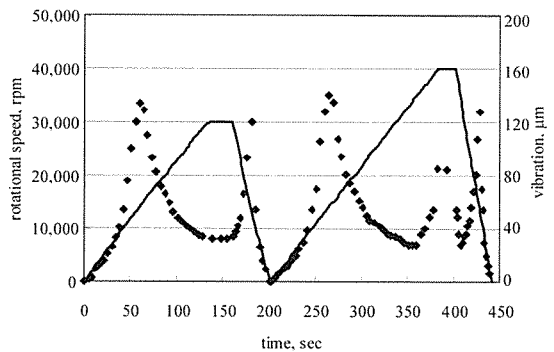


Fig. 9 Speed chart of the spin test.

효과적으로 획득하기 위해 무선통신 방법을 사용한 텔레메트리(telemetry) 시스템을 개발하였다. 텔레메트리는 스트레인게이지 센서를 포함한 센서부, 송신부, 수신부, 그리고 모니터링 PC로 구성되어 있으며, 최대 16채널까지 사용할 수 있다. 특히 송신부는 고속 회전시 원심력을 견디기 위해서 회전축의 중심과 정확히 정렬되도록 설계되었다. 로터의 표면에 4개의 원주방향 변형률 및 4개의 반경방향 변형률 측정용

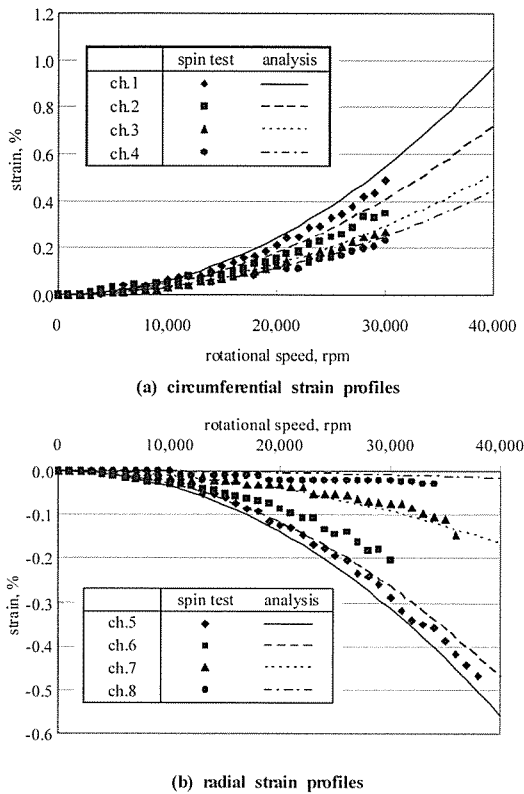


Fig. 10 Comparison of calculated strains and measured strains with respect to the rotational speed.

스트레인게이지를 부착하였으며, 각 스트레인게이지의 위치와 채널 번호는 Fig. 7에 표시하였다. 스핀 테스트를 수행하기 전에 텔레메트리 시스템이 장착된 플라이휠 로터는 정적, 동적 밸런싱 과정이 수행되어졌다. Fig. 8에 나타난 바와 같이 플라이휠 로터는 구동 스핀들에 부착된 다음, 고속 회전시 대기와의 마찰을 줄이기 위해서 챔버(chamber) 안에서 진공펌프에 의해 2mbar이하의 진공상태로 유지된다.

총 2회의 스핀 테스트가 수행되어졌다. 첫 번째 시험에서 분당 13,000rpm의 가속도를 가지고 가속되어 30,000rpm까지 도달된 후 20초간 유지된 후, 분당 44,000rpm의 가속도로 감속되어 정지하게 되었다. 두 번째 시험에서 로터는 첫 번째 시험과 같은 가속 및 감속조건을 사용하여 40,000rpm까지 도달 후 20초간 유지된 다음 정지되었다. 그리고 회전시 로터 표면으로부터 328mm 떨어진 지점에서 구동 스핀들의 반경방향 진동량이 측정되어 구동 스핀들을 포함한 로터의 공진주파수가 관측되었다. 시간에 따른 로터의 회전속도와 반경방향 진동량을 Fig. 9에 표시하였으며, 14,000rpm 근처에서 1차 공진현상이 발생하는 것 알 수 있다. 이러한 공진은 BISU Spin-Test System에 장착된 댐퍼링에

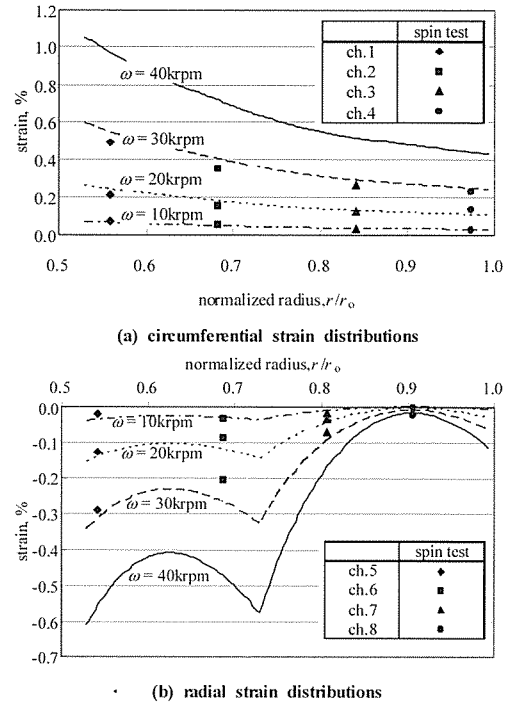


Fig. 11 Comparison of calculated strains and measured strains within the rotor.

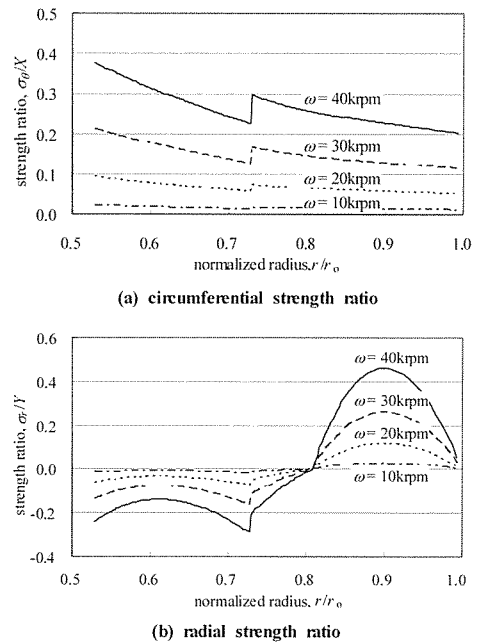


Fig. 12 Prediction of strength ratio using analytic method.

의해서 효과적으로 감소된다. 그리고 로터의 원주방향 및 반경방향 변형률이 스트레인 게이지와 텔레메트리 송신부 사이의 연결 배선이 파손될 때까지 측정되었다.

스핀 테스트로부터 측정된 변형률은 해석적 방법에 의해서 계산된 변형률과 비교 되어지며, 그 결과를 Fig. 10과 Fig. 11에 나타내었다. 반경방향의 모든 변형률 분포가 해석적 방법에 의해서 예측한 것과 매우 유사하게 압축 변형률을 보이는 것을 알 수 있다. 또한 Fig. 2의 하이브리드 복합재 로터는 로터 내측면 부근에서 반경방향으로 인장 변형률 분포를 보이고 있는 것과 대조적으로 Fig. 12의 스플릿 타입 허브를 장착한 하이브리드 복합재 로터는 로터의 내측면 뿐만 아니라 모든 부분에서 압축 변형률을 나타내고 있다. 이는 기존의 링타입 허브에 비해서 스플릿 타입 허브는 원심력에 의해서 로터의 내측면에 압축력을 가하게 되며, 결과적으로 로터의 반경방향 인장응력을 낮추어 압축 변형률이 발생하는 것으로 해석할 수 있다. 스피 테스트의 실험 결과와 해석적 방법을 이용한 계산 결과는 매우 잘 일치하고 있으며, 이러한 사실로부터 스플릿 타입 허브를 사용한 플라이휠 로터의 원주방향 및 반경방향의 강도비는 앞서 제시한 해석적 방법을 사용하여 예측이 가능하다. 예측된 원주방향 및 반경방향 강도비를 Fig. 12에 표시하였는데, Fig. 3의 하이브리드 복합재 로터의 강도비와 비교할 때 스플릿 타입 허브는 강도비를 1이하로 낮추는데 크게 기여하는 것으로 판단할 수 있다. 결국 본 연구에서 제안한 스플릿 타입 허브는 플라이휠 로터의 고속 회전시 반경방향의 강도비를 크게 낮추어 층간분리 현상을 방지하고, 로터와 허브 사이에 압축 변형률을 발생시켜 로터로부터 허브의 이탈을 방지하여, 궁극적으로 플라이휠 로터의 성능을 향상시키는 역할을 할 수 있다고 사료된다.

5. 결 론

본 연구에서는 복합재 플라이휠 로터에 작용하는 내압이 로터의 성능에 미치는 영향을 해석적 방법을 사용하여 분석하였다. 아울러 기존 허브와 로터의 내압과의 관계를 밝혀내고, 기존 허브의 단점을 보완할 수 있는 허브를 제안했다. 그리고 허브를 포함한 로터를 제작한 다음, 스피 테스트를 통해서 제안한 허브의 유효성을 검증하였다. 위의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 플라이휠 로터 시스템에서 기존 허브로 사용되고 있는 링 타입 허브는 반경방향의 인장응력을 가중시켜 로터의 최고 회전속도를 제한시키고, 저장에너지 용량을 감소시킨다.
- (2) 로터의 회전시 반경방향으로 쉽게 팽창할 수 있는 유연한 구조의 스플릿 타입 허브는 로터의 내측면에 압축력을 발생시켜서 반경방향 인장응력을 감소시켜

층간분리 현상을 방지하고, 동시에 로터와 허브의 이탈을 방지하는 역할을 한다.

- (3) 스피 테스트를 수행하면서 측정된 변형률 분포로 부터 모든 범위의 회전속도에서 반경방향으로 압축 변형률이 발생함을 관찰할 수 있었으며, 고속 회전시 로터의 파손을 일으키는 층간분리는 발생하지 않았다.
- (4) 스플릿 타입 허브는 플라이휠 로터의 가장 단점인 반경방향의 낮은 강도를 보완하는 효과를 나타내어, 저장에너지 밀도를 증가시킴으로써 대형 고효율 플라이휠 에너지 저장 시스템의 개발 가능성을 제시하였다.

참고문헌

- 1) Genta, G. *Kinetic Energy Storage*. Butterworth, 1985.
- 2) Wettergren, H. L., "Delamination in Composite Rotors," *Composites Part A*, Vol. 28A, 1997, pp. 523-527.
- 3) Ha, S.K., Jeong, H.M., and Cho, Y.S., "Optimum Design of Thick-Walled Composite Rings for an Energy Storage System," *Journal of Composite Materials*, Vol. 32, No. 9, 1998, pp. 851-873.
- 4) Ha, S.K., Yoon, Y.B., and Han, S.C., "Effects of Material Properties on the Total Stored Energy of a Hybrid Flywheel Rotor," *Archive of Applied Mechanics*, Vol. 70, No. 12, 2000, pp. 571-584.
- 5) Ha, S.K., Kim, D.J., and Sung, T.H., "Optimum Design of Multi-ring Composite Flywheel Rotor using a Modified Generalized Plane Strain Assumption," *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 43, No.4, 2001, pp. 993-1007.
- 6) Byon, O., and Vinson, J.R., "Stress Analysis of Laminated Thick-Walled Cylindrical Anisotropic Shells," *AIAA Journal*, Vol. 29, No. 12, 1990, pp. 2192-2196.
- 7) Danfelt, E.L., Hewes, S.A., and Chou, T.W., "Optimization of Composite Flywheel Design," *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 19, No. 2, 1977, pp. 69-78.
- 8) Ebrahimi, N.D., "Optimum Design of Flywheels," *Computers & Structures*, Vol. 29, No. 4, 1988, pp. 681-686.
- 9) Georgian, J. C., "Optimum Design of Variable Composite Flywheel," *Journal of Composite Materials*, Vol. 23, 1989, pp. 2-9.
- 10) Wild, P.M., and Vickers, G.W., "Analysis of Filament-wound Cylindrical Shells under Combined Centrifugal, Pressure, and Axial loading," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 28, No. 1, 1997, pp. 47-55.
- 11) 이도훈, 김선경, 김동진, 이우일, 하성규, "필라멘트 와

- 인딩 플라이휠의 스마트 경화에 관한 연구,” 한국복합재료학회지, Vol. 16, No. 1, 2003, pp. 34-41.
- 12) Gabrys, C.W., and Bakis, S.C., “Simplified Analysis of Residual Stresses in In-situ Cured Hoop-Wound Rings,” *Journal of Composite Materials*, Vol. 32, No. 13, 1998, pp. 1325-1343.
 - 13) Ha, S.K., Kim, H.T., and Sung, T.H., “Measurement and Prediction of Process-Induced Residual Strains in Thick Wound Composite Rings,” *Journal of composite materials*, Vol. 37, No. 14, 2003, pp. 1223-1237.
 - 14) Ha, S.K., and Kim, H.T., “Effects of Rotor Sizes and Epoxy System on the Process-Induced Residual Strains within Multi-ring Composite Rotors,” *Journal of Composite Materials*, Vol. 38, No. 10, 2004, pp. 871-885.
 - 15) Loos, A.C., and Nagendra, S., “Optimization of the Curing Process of Filament Wound Composites,” *34th International SMAPE Symposium*, 1989, pp. 1853-1863.
 - 16) Bakholdin, D., Bosley, R.W., Rosen, H.A., and Grayer, W., “Flywheel Rotor with Conical Hub and Methods of Manufacture Therefor,” *U.S. Patent 5,628,232*, United States, 1994.
 - 17) Flanagan, R.C., and Wong, J.J., “Energy Storage Rotor with Flexible Rim Hub,” *U.S. Patent 4,860,611*, United States, 1987.
 - 18) Herbst, J.D., Manifold, S.M., Murphy, B.T., Price, J.H., Thompson, R.C., Walls, W.A., Alexander, A., and Twigg, K., “Design, Fabrication, and Testing of 10 MJ Composite Flywheel Energy Storage Rotors,” *SAE Aerospace power systems conference*, 1998, pp. 235-244.
 - 19) Swett, D.W., “Flywheel with Self-Expanding Hub,” *U.S. Patent 6,014,911*, United States, 1998.
 - 20) Zaitsev, I.M., Portnov, G.G., and Tarnopol’skii, Y.M., “Spin-Tests of Composite Flywheel Flywheels. A Review,” *Mechanics of Composite Materials*, Vol. 33, No. 4, 1997, pp. 356-370.
 - 21) Emerson, R.P., and Bakis, C.E., “Optoelectronic Strain Measurement for Flywheels,” *Experimental Mechanics*, Vol. 42, No. 3, 2002, pp. 237-246.
 - 22) GmbH, S. R. *Spin-Test System Operating Manual; BISU*, Schenck RoTec GmbH, 1999.