

플라이휠 에너지 저장 장치용 복합재 로터 개발

김명훈*, 한훈희*, 김재혁*, 김성종*, 하성규**

Development of a Composite Rotor for Flywheel Energy Storage System

Myung-Hoon Kim, Hun-Hee Han, Jae-Hyuk Kim, Seong-Jong Kim, Sung K. Ha

Abstract

A flywheel system is an electromechanical energy storage device that stores energy by rotating a rotor. The rotating part, supported by magnetic bearings, consists of the metallic shaft, composite rims of fiber-reinforced materials, and a hub that connects the rotor to the shaft. The delamination in the fiber wound composite rotor often lowered the performance of the flywheel energy storage system. In this work, an advanced hybrid composite rotor with a split hub was designed to both overcome the delamination problem in composite rim and prevent separation between composite rim and metallic shaft within all range of rotational speed. It was analyzed using a three-dimensional finite element method. In order to demonstrate the predominant performance of the hybrid composite rotor with a split hub, a high spin test was performed up to 40,000 rpm. Four radial strains and another four circumferential strains were measured using a wireless telemetry system. These measured strains were in excellent agreement with the FE analysis. Most importantly, the radial strains were reduced using the hybrid composite rotor with a split hub, and all of them were compressive. As a conclusion, a compressive pressure on the inner surface of the proposed flywheel rotor was achieved, and it can lower the radial stresses within the composite rotor, enhancing the performance of the flywheel rotor.

Key Words: Flywheel energy storage system, Hybrid composite rotor, Split hub, Finite element method, Filament winding process, Spin test, Telemetry system, Strain measurement

1. 서 론

플라이휠 에너지 저장장치는 로터의 고속회전에 의해 관성에너지를 저장하는 장치이다. 마그네틱 베어링과 같은 비접촉, 저마찰 방식의 지지 베어링에 의해서 부양되어 회전하는 플라이휠 회전체부는 로터, 축, 그리고 로터와 축을 연결하는 허브로 구성된다. 일반금속을 사용하는 기존의 플라이휠 로터는 고속 회전시 원심력에 의해 반경방향으로 큰 응력이 발생하며, 이는 로터의 에너지 저장용량을 제한하게 된다.[1] 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 섬유 보강이 이루어지지 않아 강도가 취약해서, 회전시 반경방향의 인장응력에 의해 쉽게 층간분리(delamination) 현상이 발생된다.[2] 로터를 축에 연결하여 회전력을 전달하는 허브는 일반적으로 슬리드 링 타입이 사용되고 있다. 그러나 링 타입 허브는 복합재 로터에 비해 상대적으로 강성이 강하기 때문에 회전시 허브로부터 로터의 이탈을 초래한다.[3,4]

* 한양대학교 대학원 기계설계학과

** 한양대학교 기계정보경영학부

본 연구에서는 스플릿 허브를 장착한 하이브리드 타입의 복합재 플라이휠 로터를 개발하여 로터의 층간분리를 방지하고 동시에 허브로부터 로터의 이탈을 방지하여 로터의 에너지 저장성능을 향상시키고자 하였다. 하이브리드 타입 로터의 기본개념은 강성이 작고 무거운 재료를 내측에, 강성이 크고 가벼운 재료를 외측에 배치함으로써 회전시 반경방향으로 압축력을 작용시켜서 인장응력을 상쇄시키는 것이다. 그리고 스플릿 타입 허브는 원주방향으로 일정간격의 슬릿을 만들어 줌으로서, 회전시 원심력에 의해서 반경방향으로 쉽게 팽창하여 로터의 내측면에 압축력을 형성시켜서 로터의 내부응력을 떨어뜨리고 동시에 로터와 허브를 고정시키는 역할을 한다.

3차원 유한요소 해석을 통해서 500 Wh급 에너지 저장용량을 갖도록 Glass 로터와 Graphite 로터를 조합한 하이브리드 복합재 로터와 스플릿 허브를 설계하였다. 필라멘트 와인딩 공정을 통해서 하이브리드 복합재 로터를 제작하였으며, CNC 머신 등을 사용하여 스플릿 허브를 정밀가공하였다. 그리고 제작된 로터와 허브는 냉간 억지끼워맞춤 방법에 의해서 조립되어 최종 완성되었다.

설계, 제작된 플라이휠 로터의 구조적인 안전성을 검증하기 위해서 스피넨테스트가 수행되어졌다. 로터는 40,000 rpm까지 성공적으로 시험이 수행되어졌으며, 동시에 텔레메트리 시스템을 사용하여 로터 표면의 변형률이 무선으로 측정되었다. 스피넨테스트 결과 반경방향으로 압축변형률이 발생하였으며, 로터의 층간분리 현상은 발견되지 않았다. 결국 스플릿 허브를 사용한 하이브리드 타입 복합재 로터는 고속회전시 나타나는 로터의 층간분리 현상을 방지하고 로터와 허브의 분리를 방지함으로써 플라이휠 시스템의 성능을 크게 향상시킬 수 있다는 것을 보여주고 있다.

2. 플라이휠 로터/허브 설계 및 제작

2.1 유한요소법을 이용한 해석 및 설계

본 연구에서는 하이브리드 전기자동차의 회생 제동 및 에너지 저장장치용으로 사용될 수 있도록 500 Wh의 에너지 저장성능을 갖는 플라이휠 로터의 설계를 수행하였다. 설계시 고려할 사항으로 로터의 구조적인 안전성(safety) 및 동역학적

안정성(stability) 확보이다. 이를 위해서 Fig. 1과 같이 3차원 유한요소법(FEM)을 사용하여 응력해석 및 모드해석을 수행하였다. 해석에 사용된 재료로서 복합재 로터의 내측에 E-Glass/epoxy, 외측에 T700/epoxy의 복합재를 사용하였으며, 스플릿 허브는 알루미늄합금(7075-T7), 그리고 축(shaft)은 스틸 계열의 SCM4 재질을 사용하였다.

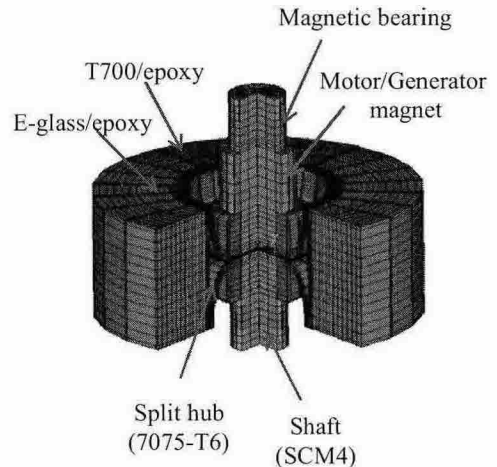


Fig. 1 FE model for structural analysis

Table. 1 500Wh flywheel rotor design specifications

Item	Specification	Unit
Energy storage	>500	Wh
Operating speed	20,000~40,000	rpm
Burst speed	58,000	rpm
It/Ip ratio	1.27	-
Safety factor	1.84	kgf
Outside diameter	340	mm
Inside diameter	180	mm
Rotor height	138	mm
Composite material	E-Glass/epoxy	mm
	T700/epoxy	
	34	46

응력해석을 수행한후 복합재 로터는 원주방향, 반경방향, 그리고 Tsai-Wu 파손이론으로 계산한 강도비가, 스플릿 허브는 Von-Mises stress를 사용

하여 계산된 강도비가 각각 1을 초과하지 않도록 설계되었다. 또한 모드해석을 수행하여 고유진동수를 계산하여 설계에 반영하였다. 유한요소법을 이용하여 설계된 플라이휠 로터의 사양은 Table. 1에 나타내었다.

2.2 하이브리드 복합재 로터/허브 제작

Table. 1과 같이 설계된 플라이휠의 제작을 위해서, 먼저 필라멘트 와인딩 공정을 이용하여 안쪽에는 E-glass/epoxy를, 바깥쪽에는 T700/epoxy를 사용한 하이브리드 타입 로터를 제작하였다. 그리고 스플릿 허브를 정밀 가공하였다. 여기서 허브는 회전시 원심력에 의해 반경방향으로 쉽게 펼쳐질 수 있도록 슬릿(slit)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. 드라이 아이스를 이용한 억지끼워맞춤(interference fit) 방법을 사용하여 허브와 축, 그리고 복합재 로터를 조립한 후, 동적 밸런싱 작업을 수행하여 질량 불균형(unbalance)을 보정하였다. 최종 제작된 플라이휠 로터를 Fig. 2에 나타내었다.

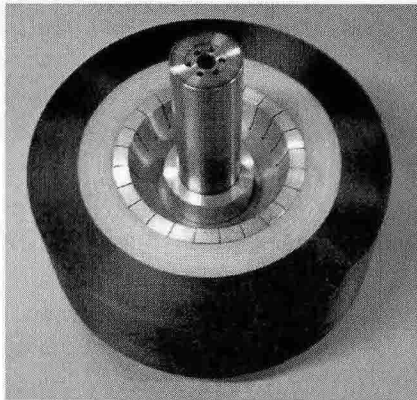


Fig. 2 Manufactured flywheel rotor with hub

3. 스피 테스트

3.1 고속 스피 테스트

설계 제작된 플라이휠 로터의 성능을 실험적으로 확인하기 위해서 고속 스피 테스트가 수행되어졌다. 로터의 스피 테스트에 사용된 장비는

SCHENCK사에서 제작된 BI5U 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 지지 베어링부의 문제점을 최소화시키고, 위험속도(critical speed)에서 불균형 응답을 효과적으로 감쇄시키도록 설계되었다. 그리고 변위 센서의 의해서 구동 스피들의 반경방향 진동량이 모니터링되며, 과도한 진동량이 감지되면 자동으로 감속시키도록 설정되어 있다.[5]

스피 테스트시 로터 내의 변형률 측정을 통해서 스플릿 허브를 장착한 하이브리드 복합재 로터의 성능이 확인된다. 본 연구에서는 고속 회전체에 부착된 스트레인게이지로부터 측정된 변형률 데이터를 효과적으로 획득하기 위해 무선통신 방법을 사용한 텔레메트리(telemetry) 시스템을 개발하였다. 텔레메트리는 스트레인게이지 센서를 포함한 센서부, 송신부, 수신부, 그리고 모니터링용 PC로 구성되어 있으며, 최대 16 채널까지 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 스트레인게이지를 부착하였으며, 각 스트레인게이지의 위치와 채널 번호는 Fig. 3에 표시하였다.

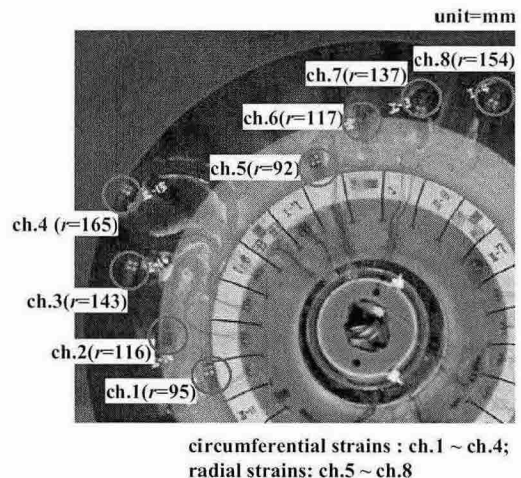


Fig. 3 Flywheel rotor with telemetry for spin test

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 40,000 rpm까지 도달 후 20초간 유지된 다음 정지되었다.

3.2 스핀테스트 결과

로터의 원주방향 및 반경방향 변형률이 텔레메트리 시스템에 의해서 측정되었다. Fig. 4에 나타난 바와 같이 측정된 변형률은 FEM을 이용한 해석결과와 비교되어진다. 스핀테스트의 실험결과와 FEM 해석결과는 매우 잘 일치하고 있다. 특히 반경방향으로 모든 변형률 분포가 FEM 해석에 의해서 예측한 것과 매우 유사하게 압축 변형률을 보이는 것을 알 수 있다. 결국 본 연구에서 제안한 스플릿 허브를 장착한 하이브리드 복합재

플라이휠 로터는 고속회전시 반경방향의 강도비를 크게 낮추어 층간분리 현상을 방지하고, 로터와 허브 사이에 압축 변형률을 발생시켜 로터로부터 허브의 이탈을 방지함으로써 플라이휠 로터의 성능을 향상시키는 역할을 한다.

4. 결론

본 연구에서는 스플릿 허브를 장착한 하이브리드 타입 복합재 로터의 설계, 제작, 그리고 스핀테스트를 수행하였다. 40,000 rpm까지 성공적으로 스핀테스트가 수행되었으며, 텔레메트리를 이용하여 측정된 변형률은 FEM 해석결과와 비교되었다. 반경방향으로 모두 압축변형률이 측정되었으며, 복합재 로터의 층간분리 현상은 발견되지 않았다. 결국 스플릿 허브와 하이브리드 타입을 조합한 플라이휠 로터는 저장에너지 밀도를 크게 증가시킴으로써 대형 고출력 플라이휠 에너지 저장 시스템의 개발 가능성을 제시하였다.

참고문헌

- (1) Genta, G. Kinetic Energy Storage, Butterworth, 1985.
- (2) 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.
- (3) Flanagan, R.C., and Wong, J.J. Energy Storage Rotor with Flexible Rim Hub," U.S Patent 4,860,611, United States, 1987.
- (4) 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.
- (5) GmbH, S. R. Spin-Test System Operating Manual; B15U, Schenck RoTec GmbH, 1999.

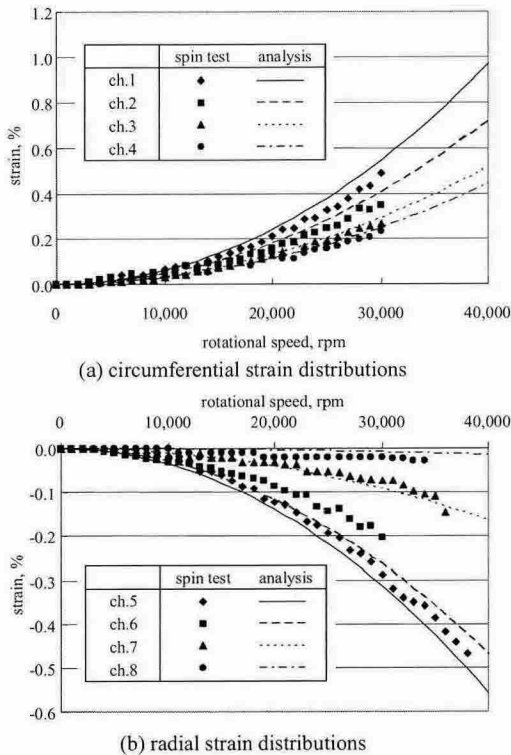


Fig. 4 Comparison of calculated strain and measured strain