

5 kWh 복합재 플라이휠 로터의 회전 시험

한훈희^{1*}, 하성규¹, 김재혁¹
¹한양대학교 기계공학과

Spin Test of 5 kWh Composite Flywheel Rotor

Hoon-Hee Han^{1*}, Sung-Kyu Ha¹ and Jae-Hyuk Kim¹

¹Department of Mechanical Engineering, Hanyang University

요약 본 논문은 5 kWh 복합재 플라이휠 로터를 설계/제작 하고, 회전 시 복합재 로터에 발생하는 변형률 분포와 로터의 파손 속도를 측정하기 위해 회전 시험을 수행하였다. 회전 시험 시 블루투스 방식의 무선 통신시스템을 이용하여 복합재 로터의 반경방향과 원주방향의 변형률을 실시간으로 측정하였다. 측정된 로터 변형률과 미리 예측된 로터 변형률을 비교하여 초기 로터 설계를 검증하였다. 복합재 로터는 파손속도인 22,000 rpm보다 11 % 낮은 19,499 rpm에서 파손 되었다. 파손은 축과 복합재 로터를 연결하는 허브에서 발생하였다. 본 논문은 일반적인 관점에서 로터의 성능을 검증하였고, 고속 회전하는 복합재 로터의 예상치 않은 파손 위험을 입증하였다. 플라이휠 에너지 저장 시스템 설계 시 복합재 로터 뿐 아니라 허브 설계에도 특별한 주의가 요구된다. 플라이휠 에너지 저장 시스템을 실시간으로 관찰하기 위해서, 특히 높은 원심력을 받는 동안에도 작동 될 수 있는 무선 통신 시스템 개발이 앞으로 선행 되어야 한다.

Abstract A 5 kWh composite flywheel rotor was designed and manufactured, and its spin test was performed to monitor strain distribution and burst speed. Strain distribution in radial and circumferential directions of the rotor were measured using a wireless telemetry system based on bluetooth technology for real-time strain measurement. The strains was compared with pre-calculated design values to verify the initial rotor design. We noticed the rotor failed at 19,499 rpm in the spin test, 11 % lower than the predicted burst speed of 22,000 rpm. Failure occurred at the hub which connects the shaft and the composite rotor. The performance of the composite rotor was confirmed in a general sense, and the danger of unexpected failure of composite rotor during high-speed spinning was also demonstrated in this paper. Special attention should be paid to not only composite rotor but also hub when designing a flywheel energy storage system. The telemetry system needs to be further developed, especially enduring the high centrifugal forces, and can be used in a real time monitoring system for the flywheel energy storage system.

Key Words : Flywheel energy storage system, Composite rotor, Spin test, Burst speed, Telemetry system, Strain measurement

1. 서론

플라이휠 에너지 저장장치는 복합재 로터, 지지베어링, 고속 모터 발전기, 제어시스템 등의 첨단 기술을 필요로 하는 친환경적 대체에너지 시스템으로 세계 여러 연구기관에서 개발 진행 중이다[1]. 플라이휠 에너지 저장 시스템은 플라이휠 로터의 고속회전을 이용하여 회전관

성으로 에너지를 저장하기 때문에 회전체의 안정성이 매우 중요하다[2-5]. 시스템의 안정성을 확보하는 방법으로는 크게 고속 회전시 회전체의 실시간 변형을 감지하고, 그에 대응하여 시스템을 컨트롤 하는 능동적 방법과, 회전체가 파손 되었을 때 회전체 파편이 시스템 외부로 방출되지 못하도록 보호벽을 설치하는 수동적 방법이 있다. 고속 회전시험은 설계된 복합재 플라이휠 로터의 안전

*교신저자 : 한훈희(thmec@hanyang.ac.kr)

접수일 10년 07월 29일

수정일 (1차 10년 08월 19일, 2차 10년 08월 21일)

계재확정일 10년 09월 08일

성을 확인할 수 있는 가장 이상적인 시험방법이다. 회전 시험은 로터가 파손될 때까지 회전시키는 파손시험(burst test)과, 최대 허용회전속도와 파손속도 사이에서 회전시켜 로터의 성능을 확인하는 검증시험(proof test)으로 나눌 수 있다[6-8]. John widmer[9]는 에폭시에 함침 시킨 우븐 리본(woven ribbon)을 금속허브에 직접 감아 로터를 제작한 후 회전시험을 수행하였다. Zaitsev[10]는 몰딩 타입과 와인딩 타입의 플라이휠 로터를 제작하여 각각 회전 시험을 수행하고, 고속 회전시 로터의 파손속도와 저장되는 에너지를 비교하였다. Herbst[11]는 금속재료의 원추형허브와 복합재 로터를 유연한 구조의 복합재 아머(arbor)로 연결하여 10 MJ 용량의 플라이휠 로터를 제작하여 회전 시험을 수행하고, 레이저 센서를 이용하여 로터의 반경방향 변형률을 측정하였다. Takahashi[12]는 축과 복합재 로터를 스포크 형태의 허브로 연결하여 2개의 354 Wh 용량의 플라이휠 로터를 제작하고 1차 시험에서는 복합재 링의 회전시험을, 2차 시험에서는 복합재 링 외곽에 추가로 와인딩을 한 로터를 회전속도에 따른 진동량을 분석하였다. Ha[13]는 고속 회전시 복합재 로터 내부에 발생하는 반경방향 응력을 줄일 수 있는 스플릿 타입 허브를 이용하여 500 Wh 용량의 복합재 플라이휠 로터를 제작하고, 회전시험을 통해 복합재 로터 내부에 발생하는 변형률 분포를 측정하였다.

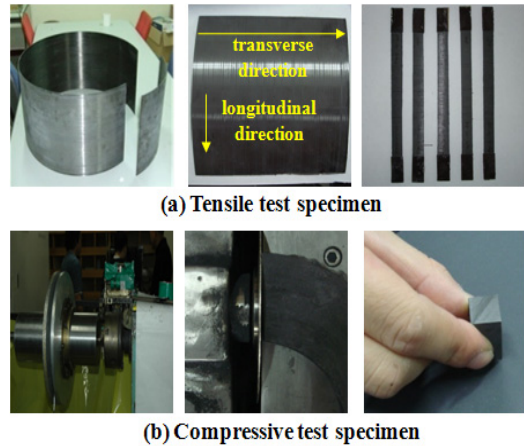
본 연구에서는 기존의 소형 복합재 로터 회전시험과 달리 5 kWh 대형 복합재 로터를 설계/제작하고, 파손속도까지 회전시험을 수행하였다. 복합재 로터 설계를 위해 T700/Epoxy와 E-glass/Epoxy의 복합재료 강도 측정시험을 선행하였다. 회전축과 복합재 로터는 응력저감형 스플릿허브를 이용하여 연결하였다. 링 타입의 무선통신시스템을 이용하여, 고속 회전시 로터표면에 부착된 센서로부터 로터의 변형률 데이터를 실시간으로 확보하였다. 측정된 로터 변형률과 미리 예측한 로터 변형률 비교하여 설계된 로터의 성능을 검증하였다.

2. 연구 내용

2.1 복합재료의 강도 시험

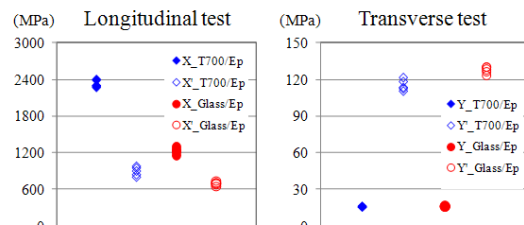
고속 회전하는 복합재 플라이휠 로터 설계시 복합재료의 강도는 매우 중요한 설계요소이다. 본 논문에서는 복합재료의 인장/압축 강도측정 시험을 수행하였다. Toray사의 T700-12K 탄소섬유, Owens coning사의 RS2300-366 유리섬유, Hexion사의 Epikote166 주제와 D-230 경화제를 사용하여 그림 1과 같이 강도측정 시험

을 위한 시편을 제작하였다.



[그림 1] 복합재료 인장/압축 강도시험용 시편

강도 시험은 상온에서 R&B사 RB301 만능시험기를 이용하여 각각 5회에 걸쳐 실험하였고, 결과는 그림 2와 같다. X와 X'은 섬유 방향(longitudinal)의 인장강도(tensile strength)와 압축강도(compressive strength)를 Y와 Y'은 섬유 횡(transverse)방향의 인장강도와 압축강도를 나타낸다.



[그림 2] 복합재료 인장/압축 강도

2.2 복합재 플라이휠 로터 설계/제작

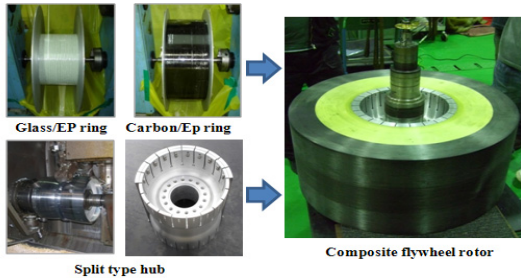
앞선 강도 시험으로 얻은 물성값을 이용하여 표 1과 같은 사양의 복합재 플라이휠 로터를 설계하였다. 복합재 로터는 내측의 E-glass/Epoxy 링과 외측의 T700/Epoxy 링으로 구성된다.

설계된 복합재 로터는 필라멘트 와인딩 공법으로 제작하였다[그림 3]. 와인딩시 복합재 섬유는 8 ~ 10 N 장력으로 50 rpm으로 회전하는 멘드렐에 와인딩된다. 와인딩이 끝난 로터는 오토클레이브 내에서 80 °C의 온도로 4 시간 동안 경화과정을 거친다. 이와 같은 중온경화는 고온경화에 비해 적은 잔류 응력이 발생된다[14]. 경화가 끝난 로터는 정밀가공을 한 후, 유압프레스를 이용 역시

끼워맞춤 방법으로 조립하였다. 축과 복합재 로터를 연결하는 허브는 폭 1 mm, 15° 각도로 총 24개의 균일한 간격으로 찢어진 장구통 형상으로 고속 회전시 반경방향으로 쉽게 변형이 되며, 복합재 로터 내부에 반경방향 압축 응력을 발생시킨다. 이때 발생하는 압축응력은 고속 회전시 로터내부에 발생하는 반경방향 인장응력을 상쇄시킨다.

[표 1] 5 kWh 복합재 플라이휠 로터 사양

Specifications	Symbol	5 kWh	Unit
Burst speed	ω_{burst}	22,000	rpm
Maximum operating speed	ω_{max}	19,000	rpm
Hub ring thickness	t_h	15.0	mm
rotor inner radius	r_i	163.0	mm
Thickness of rim1 (Glass/Ep)	t_1	110.0	mm
Thickness of rim2 (Graphite/Ep)	t_2	77.0	mm
Interference between rim1 and rim2	δ_1	0.90	mm
Rotor height	h	320.0	mm
Rotor	Polor moment of inertia	I_p	12.3 kg-m ²
	Ip/It ratio	I_p/I_T	1.60
	Maximum stored energy	E_{max}	6,742 Wh
	Usable energy	E_{usable}	5,057 Wh
	Mass	M	172 kg
	Specific enery density	SED_{usable}	29 Wh/kg
Flywheel (shaft+hub+rotor)	Polor moment of inertia	I_p	12.7 kg-m ²
	Ip/It ratio	I_p/I_T	1.35
	Maximum stored energy	E_{max}	6,997 Wh
	Usable energy	E_{usable}	5,247 Wh
	Mass	M	230 kg
	Specific enery density	SED_{usable}	22.8 Wh/kg

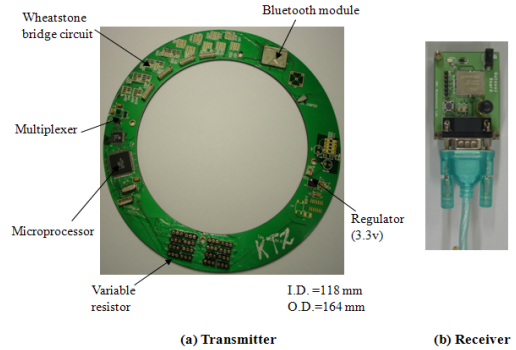


[그림 3] 복합재 플라이휠 로터

2.3 원형 무선 통신 시스템

회전 시험시에 복합재 로터의 변형을 실시간 무선으로 측정하기 위하여 그림 4와 같이 링 타입의 무선 통신시스템을 사용하였다. 이 시스템은 크게 송신부(transmitter)와 수신부(receiver)로 구성이 된다. 표 2에서와 같이 송신부는 10 bit 마이크로프로세서를 기반으로 블루투스 모듈로 구성되어 무선 송신이 가능하며, 최대 16개 채널을 이용할 수 있다. 수신부는 데이터 수신을 위한 블루투스 모듈과 직렬통신용 RS232 모듈, 데이터 분석용 PC로 구성된다. 통신 채널별 오차율은 5%이내의 정확도를 가진다.

원형 타입은 축 내부에 공간을 만들어 설치하던 기존 바(bar) 타입에 비해서 플라이휠 시스템에 설치하기가 매우 효과적이다.



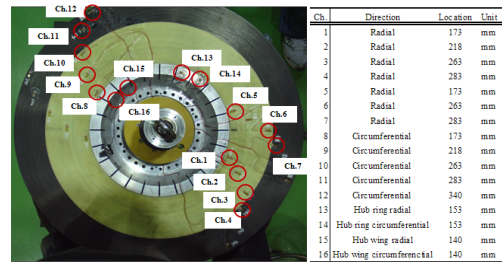
[그림 4] 링 타입 무선 통신 시스템

[표 2] 링 타입 무선 통신 시스템 사양

Specification	Wireless Telemetry system	Unit
Data Transmission type	Bluetooth type (2.4GHz)	-
Connecting type (PC to receiver)	RS232	-
Resolution	10	bit
signal input voltage range	0 ~2.56	V
signal voltage gain	147.85	-
Number of ch.	16	ch.

2.4 고속 회전 시험

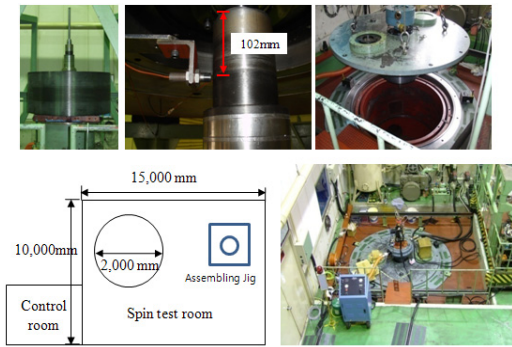
고속 회전시 복합재 로터의 변형을 실시간으로 측정하기 위하여 그림 5와 같이 센서(strain gauge)를 부착하였다. 총 16개 채널 중 채널 1 ~ 7은 복합재 로터의 반경방향 변형량을 측정한다. 채널8 ~ 12는 복합재 로터의 원주방향 변형량을 측정한다. 센서와 송신부 연결선은 예폭시를 도포하여 회전시 로터 표면으로부터 이탈을 방지하였다. 송신부는 원형부 중앙에 축을 관통시켜 허브의 몸통부위에 볼트로 고정시켰다.



- Rotor
 Radial mechanical strains : ch. 1- ch. 7;
 Circumferential mechanical strains : ch. 8- ch. 12
 - Hub
 Ring : ch. 13 - ch. 14;
 Wing : ch. 15 - ch. 16

[그림 5] 복합재 로터 변형률 측정을 위한 센서

5 kWh 복합재 플라이휠 로터의 회전시험은 Maruwa Electronic사의 장비를 이용하였다. 회전 시험은 그림 6과 같이 안전을 위하여 50 mm 두께의 강철 프로텍터가 2층으로 설치된 지름 2,000 mm, 깊이 1,900 mm 크기의 지하 챔버 내부에서 이루어졌다.



[그림 6] 고속 회전 시험 장치

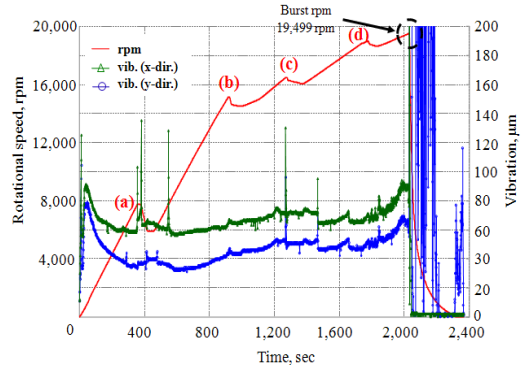
회전 시험기는 표 3과 같이 최대 300 kg의 회전체를 30,000 rpm까지 회전시킬 수 있다. 구동은 60 kW용량의 에어 터빈 모터를 이용하고, 진공펌프로 챔버 내부의 압력을 80 Pa이하로 유지시켰다.

[표 3] 회전 시험기 사양

Specification	MEI(Maruwa Electronic Inc.)	Unit
Maximum Diameter	2,000	mm
Maximum Height	1,900	mm
Weight Capability	300	kg
Speed Capability	30,000	rpm
Motor type	Air turbine motor	-
Motor power	60	kW
Vacuum	below 80	Pa
Monitoring sensor	2-axis (displacement)	-
Steel Protector (double rim)	50	mm

회전 시험은 복합재 플라이휠 로터의 파손 속도인 22,000 rpm을 최종 속도로 설정하여 수행되었다. 회전시 복합재 로터의 진동량은 x, y방향 모두 100 ~ 250 μm , 가속도는 5 ~ 22 rpm/s, 모터 구동 토크는 허용 하중의 90%로 설정하였으며, 위 값의 범위를 벗어날 경우 자동 감속을 하도록 설정하였다. 0 rpm에서 시작하여 로터의 파손이 발생한 19,499 rpm까지 시간에 따른 로터 회전속도 및 반경방향 진동량은 그림 6과 같다. 그림 6의 (a)와 같이 회전 속도가 7,800 rpm에 도달하자 1차 고유진동으로 인해 y방향 진동량이 103 μm 이 되어 1차 감속이 되었다가, 5,900 rpm에서 동일 조건으로 재 가속하였다. 11,000 rpm과 13,000 rpm에서 센서의 파손으로 신호가 단절되

었다. 14,950 rpm에서, 모터의 최대 구동 하중의 90% 도달하여 (b)에서와 같이 2차 감속을 한 후 로터의 가속도를 10 rpm/s로 재설정 후 14,400 rpm부터 재 가속하였다.

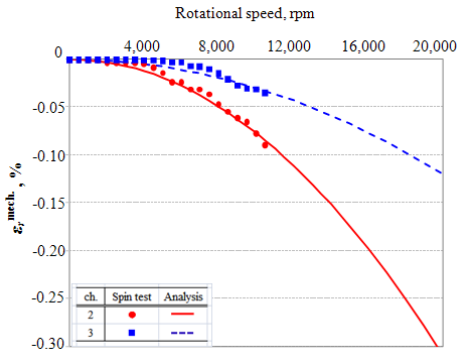


[그림 6] 회전 시험 속도 및 진동량 그래프

16,000 rpm에서 x방향 96 μm , y방향 130 μm 의 진동량이 발생하여 3차 감속하였다. 16,000 rpm에서 5 rpm/s의 가속도로 회전을 시작하여 최대 운전 속도인 19,000 rpm에 도달한 후, (d)와 같이 자유 회전상태를 유지하였다. 가속도를 20 rpm/s로 설정하고 재 가속하여 19,499 rpm이 되었을 때 x방향 61 μm , y방향 90 μm 의 진동량을 보이다가 순간적인 굉음과 함께 로터의 파손이 이루어 졌다.

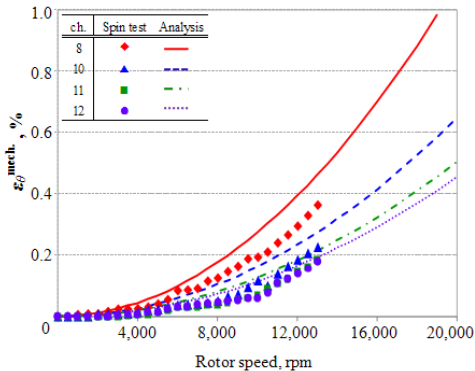
3. 결과 및 고찰

5 kWh 복합재 로터의 회전시 발생하는 변형률은 그림 7, 8과 같다. 실선과 점선은 복합재 플라이휠 로터를 유한요소법[14]을 이용하여 해석하여 얻은 예측 값이며, 점은 회전 시험동안 무선 통신 시스템으로 획득한 데이터를 변형률로 변환한 값이다. 총 16개의 센서 중에서 원심력으로 인해 로터 표면으로부터 센서의 이탈 및 센서 배선 끊김 현상으로 실제로는 6개의 센서로부터 데이터를 획득 하였으며, 13,000 rpm 이후의 신호는 센서의 파손으로 데이터 획득에 실패하였다. 그림 7을 보면 반경방향 변형률 분포가 해석적 방법으로 예측된 변형률과 매우 유사하게 압축 변형률로 보이는 것을 확인하였다. 또한 로터의 내경에 가까울수록 반경방향 변형률이 커짐을 알 수 있다. 압축 변형률을 발생시키는 원인은 복합재 로터 내측에 내압을 가하는 스플릿 허브와 Glass/Ep링과 Carbon/Ep링의 역지끼워 맞춤조립 영향이다.



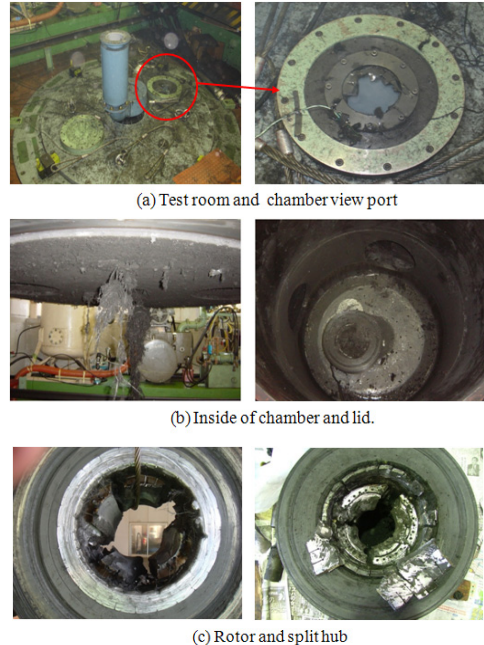
[그림 7] 회전 속도에 따른 로터의 반경방향 로터 변형률 분포

그림 8을 보면 원주방향 변형률 분포가 해석적 방법으로 예측된 변형률과 유사하며, 반경방향으로 멀수록 원주방향 변형률이 커짐을 알 수 있다.



[그림 8] 회전 속도에 따른 로터의 원주방향 로터 변형률 분포

회전 시험에 사용된 5 kWh 복합재 플라이휠 로터는 9,500 rpm에서 19,000 rpm의 운전영역을 갖으며, 파손 속도 22,000 rpm로 안전계수 1.34로 설계되었다. 그러나 실제 회전 시험 시험에서 파손 속도 보다 11 %정도 낮은 19,499 rpm에서 파손이 되었다. 그림 9는 파손된 복합재 로터를 나타내고 있다. 축과 복합재 로터를 연결하는 허브의 파손으로 로터가 회전축으로부터 이탈되었다. 복합재 로터는 이탈된 후 챔버 내부의 보호벽과 마찰에 의한 스크래치를 제외하고 외형적으로 안정적인 형태를 유지하였다.



[그림 9] 회전 시험시 파손된 복합재 로터

4. 결론

본 연구에서는 복합재료의 강도 측정 시험을 수행하여 얻은 값을 이용하여 5 kWh 에너지 저장 용량을 갖는 복합재 플라이휠 로터를 설계/제작하였다. 제작된 복합재 플라이휠 로터의 회전시험을 수행하여 회전시 로터의 변형률을 측정하고 미리 예측한 변형률과 비교하여 로터의 안정성을 검증 하였을 뿐 아니라, 복합재 플라이휠 로터의 파손에 대한 위험성을 확인하였다. 플라이휠 에너지 저장 시스템 설계시 복합재 로터 뿐 아니라 허브 설계에도 특별한 주의가 요구된다. 본 연구에 사용된 무선 통신 시스템은 고속 회전에 의한 원심력의 영향으로 시험 중 로터 표면으로부터 이탈 및 파손이 발생되어 목표 회전 수까지 로터 변형률 정보 확보에 실패하였다. 고속 회전 하는 동안 파손 되지 않고 작동 될 수 있는 무선 통신 시스템의 개발이 필요하다.

참고문헌

[1] Genta, G., "Kinetic Energy Storage", Butterworths & Co., Ltd., London, 1945.
 [2] Thomas J. Pieronek, D. Kent Decker, Vitor A.

Spector., "Spacecraft Flywheel Systems – Benefit and Issues, National Aerospace and Electronics Conference, Proceedings of the IEEE, Dayton, USA, pp. 589-593.

[3] Nakai, H., Matsuda, A., Suzuki, M., "Development and Testing of the Suspension System for a Flywheel Battery", Control Engineering Practice, Vol. 9, pp. 1039-1046, 2001.

[4] Haichang, L., Jihai J., "Flywheel Energy Storage-An Upswing Technology for Energy Sustainability," Energyand Buildings, Vol. 39, pp. 599-604, 2006.

[5] Anthony J. Colozza., "High Energy Flywheel Containment Evaluation", NASA/CR-2000-210508, 2000.

[6] Ahsley, S., "Designing Safer Flywheels", Mechanical Engineering, pp. 88-91, 1996.

[7] Gabrys, C.W., and Bakis, C.E., "Design and Testing of Composite Flywheel Rotors", Composite Materials: Testing and Design, Vol. 13, pp. 3-22, 1998.

[8] Yasuo, K., Hiroshi, H., Hiroyuki, K., Takahashi, S., Hisaichi, O., Tomoaki, M., " Spin Burst Test of Carbon-Carbon Composite Disk", Journal of Composite Materials, Vol. 32, No. 11, pp. 1017-1035, 1998.

[9] Widmer, J., von Burg, P., "Failure of Tangentially Wound Composite Energy Storage Flywheel (Safety Aspects of Rotor Bursts)", International Conference Composite Materials and Energy, ENERCOMP95, Montreal, Canada, 1995.

[10] Zaitsev, I.M., Portnov, G.G., "Spin-tests of Composite Flywheels", Mechanics of composite materials, Vol. 33, No. 4, pp. 356-370, 1997.

[11] Herbst, J.D., Manifold, S.M., Murphy, B.T., Price, J.H., "Design, Fabrication, and Testing 10MJ Composite Flywheel Energy Storage Rotors", Aerospace Power Systems Conference, pp. 235-244, 1998.

[12] Takahashi, K., Kitade, S., "Development of High Speed Composite Flywheel Rotors for Energy Storage Systems", Advanced Composite Materials, Vol. 11, No. 1, pp. 41-50, 2002.

[13] Ha, S.K., Kim, M.H., Han, S.C., Sung, T.H., "Design and Spin Test of a Hybrid Composite Flywheel Rotor with Split Type Hub", Journal of Composite Materials, Vol. 27, pp. 953-965, 2006.

[14] Ha, S.K. and Kim, H.T., "Effects of Rotor Sizes and Epoxy System on the Process-Induced Residual Strains with Multi-ring Composite Rotors", Journal of

Composite Materials, Vol. 38, No. 10, pp. 871-885, 2004.

한 훈 희(Hoon-Hee Han)

[정회원]



- 2006년 2월 : 한양대학교 기계공학과 (공학석사)
- 2006년 3월 ~ 현재 : 한양대학교 기계공학과 박사과정

<관심분야>

플라이휠 에너지저장 시스템, 최적설계, 구조해석

하 성 규(Sung-Kyu Ha)

[정회원]



- 1988년 12월 : Stanford University (공학박사)
- 1991년 7월 : Stanford University 박사후 연구원
- 1991년 8월 ~ 현재 : 한양대학교 기계공학과 교수

<관심분야>

복합재역학

김 재 혁(Jae-Hyuk Kim)

[정회원]



- 2006년 2월 : 한양대학교 기계공학과 (공학석사)
- 2006년 3월 ~ 현재 : 한양대학교 기계공학과 박사과정

<관심분야>

플라이휠 에너지저장 시스템, 모니터링