

도시철도차량 주행풍을 이용한 터빈형 플라이휠 에너지 저장시스템 개발에 관한 연구

서용범^a, 임재문^b, 신광복^{c*}

Development of a Turbine Based Flywheel Energy Storage System Using Traveling Wind Power of an Urban Train

Yong-Bum Seo^a, Jae-Moon Im^b, Kwang-Bok Shin^{c*}

^a Research Planning Team, 613-6, Bangchuk-ri, Sari-myeon, Goesan-gun, Chungcheongbuk-do, 367-822, Korea

^b Grad. School of Dept. of Mechanical Engineering, Hanbat National University, Dongseo-daero 125, Yuseong-gu, Daejeon 305-719, Korea

^c Dept. of Mechanical Engineering, Hanbat National University, Dongseo-daero 125, Yuseong-gu, Daejeon 305-719, Korea

ARTICLE INFO

Article history:

Received 3 June 2014
Revised 14 August 2014
Accepted 18 August 2014

Keywords:

Flywheel energy storage system
Traveling wind
Wind turbine
Energy harvesting

ABSTRACT

This study aims to develop a Flywheel Energy Storage System (FESS) that uses wind power produced when an urban train is in motion, by utilizing a mounted turbine. This system was designed to generate and store electric power from wind power of a travelling urban train. The flywheel was designed to continue rotation using a one-way clutch bearing installed in the turbine shaft pulley, even in cases where the urban train decelerates or stops. This FESS can generate an additional 44% of electric power in comparison to a system not equipped with a flywheel. The generated power and operational features of the FESS were evaluated and verified through a wind tunnel test. The results show that the electric power stored in the FESS could supply auxiliary power for urban train components or service equipment, such as charging mobiles, Wi-Fi modules, and electric lights.

1. 서론

최근 무분별한 화석연료 사용으로 인해 연료 가격 급등, 지구 온난화, 그리고 생태계 불균형과 같은 심각한 문제가 발생되고 있다. 전세계적으로 OECD 가입국의 평균 이산화탄소 배출 증가율은 0.8%인데 반해, 국내의 경우 1985년 이후 연평균 8.7%의 이산화탄소 배출증가율을 보이고 있다^[1]. 이는 세계에서 가장 높은 수치이며, OECD 평균보다 10배 이상 높은 수치이다. 세계 여러 국가

들은 이와 같은 문제를 해결하기 위해 온실가스 감축방안, 대체 에너지원 개발에 대한 관심을 높이고 있다.

또한, 선진국을 중심으로 UN기후변화협약(UNFCCC; United Nations Framework Convention on Climate Change, 1992), 교토 의정서(Kyoto Protocol, 1997) 등과 같이 이산화탄소 배출량을 규제하기 위한 제도적 장치를 마련하고 있다^[2].

따라서, 지구 온난화의 가장 큰 영향을 미치는 이산화탄소 배출량 절감을 위해서 전세계적으로 친환경 신재생 에너지원 개발에

* Corresponding author. Tel.: +82-42-821-1156

Fax: +82-42-821-1587

E-mail address: shin955@hanbat.ac.kr (Kwang-Bok Shin).

대한 연구 및 상용화가 활발히 이루어지고 있다. 친환경 신재생 에너지원은 크게 태양열, 풍력, 수력, 지열 에너지 등으로 분류되며, 특히, 풍력에너지는 다른 친환경 신재생 에너지원에 비해 설치비용 및 설치 소요면적이 작기 때문에 보급률이 높아지고 있으나 발전효율성이 높은 대형 풍력발전에 대한 연구가 보편화되어, 소형 풍력 발전에 대한 연구는 미비한 실정이다.

이러한 친환경 신재생 에너지원의 개발과 동시에 생산된 에너지에 대한 효율적인 활용을 위해 에너지를 저장할 수 있는 에너지 저장시스템(Energy Storage System, ESS)에 대한 연구개발도 활발히 이루어지고 있다^[3-5].

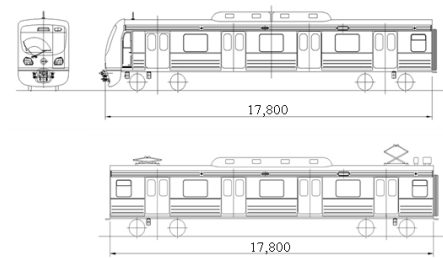
에너지 저장시스템에는 리튬이온전지, 나트륨 황 전지, 레독스 흐름 전지, 슈퍼 캐패시터 그리고 플라이휠(Flywheel) 등이 있으며, 최근 선진국 위주의 연구개발 및 실증이 이루어지고 있으며 일부는 상용화에 성공하여 사업화 단계에 진입하였다. 에너지 저장시스템 중 플라이휠은 잉여 에너지를 이용해 플라이휠을 회전시켜 회전운동의 역학적 에너지 상태로 저장하여 필요 시 발전기를 구동, 전기 에너지의 형태로 에너지를 사용할 수 있는 에너지 저장시스템이다. 플라이휠은 높은 전력밀도와 에너지밀도, 짧은 충전시간, 반영구적 수명, 환경친화성 등의 장점을 가지며 대형발전소의 에너지 저장시스템, 무정전 전원장치, 차량의 에너지 효율 및 성능 향상용으로 사용되고 있다. 또한, 국내에서도 초소형 플라이휠 에너지 저장장치 설계 연구를 수행하였으며^[6], 100 kWh급 플라이휠 에너지 저장장치용 자기 베어링 시스템 설계 연구도 수행되었다^[7]. 철도차량 분야에서는 감속시 버려지는 에너지를 플라이휠에 저장하여 가속시 사용하기 위한 플라이휠 에너지 저장시스템의 연구 사례가 있고^[8], 철도차량 추진제어장치의 성능시험을 위한 시험설비로도 플라이휠이 사용되고 있다^[9].

본 논문에서는 대전 도시철도 1호선에의 영업운영 중인 철도차량의 운행간 발생하는 주행풍을 이용하여 버려지는 인공 풍력에너지를 통해 전기에너지를 생산 및 저장할 수 있는 터빈 구동형 플라이휠 에너지 저장시스템(FESS)을 설계하고 현재 운행되고 있는 철도차량에 적용할 수 있는 시스템을 개발하는 데 목적을 두고 있다. 발생한 전력은 객차 내 고객서비스 시설에 대한 전력공급 및 축전지 충전을 통한 역사 내 보조 전력원으로 활용될 수 있도록 에너지 효율을 선정하였다. 실제 차량 운행조건을 적용한 평가를 위해 대전도시철도 1호선의 운행조건과 차량을 기반으로 설계 및 성능 평가를 수행하였다.

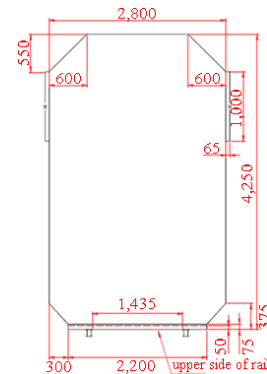
2. 에너지 저장시스템의 설계

2.1 시스템의 설계 한계

본 연구를 통해 개발된 에너지 저장시스템은 도시철도 운행환경



(a) Length of railway vehicle



(b) Specifications of cross-section of railway vehicle

Fig. 1 Vehicle specifications of Daejeon urban train line 1

Table 1 Clearance between railway vehicle roof and tunnel

	Max. Clearance	Min. Clearance
Depot-Banseock	570 mm	470 mm
Banseock-Jijok	610 mm	450 mm
Jijok-Noeun	650 mm	510 mm
World Cup Stadium	530 mm	480 mm

에 적용되기 때문에, 시스템의 성능을 극대화하면서 운행에 방해가 되지 않도록 설계되어야 한다. 이때, 본 시스템은 이미 상업운영중인 차량을 대상으로 하고 있어 차체 상부에 돌출되는 형태로 체결되어야 하므로 터널 높이 및 팬터그래프와의 간섭, 그리고 차량 환기시스템과의 영향성을 고려하여 설계되어야 한다.

본 연구에서 연구대상으로 선정된 대전도시철도 1호선의 차량 루프부에는 팬터그래프와 에어컨박스 등이 존재하며 철도차량과 터널 사이의 여유공간이 구간별로 다르기 때문에 이를 고려하여 기구설계를 수행하였다. 대전도시철도 1호선의 차량은 중형전동차로 차량 규격은 폭 2,800 mm, 높이 4,250 mm, 길이 17,800 mm이다. Fig. 1은 대전도시철도 1호선의 차량 제원을 나타내고 있다. 이때, 에너지 저장시스템의 설계한계는 터널 높이가 가장 낮은 반석-지족 구간을 기준으로 선정하였다. Table 1은 철도차량과 터널 사이 여유공간을 구간별로 보여준다.

Table 1의 설계조건을 고려하여, 본 시스템의 설계한계는 폭 960 mm, 높이 450 mm, 길이 1,200 mm로 선정하였다.

2.2 시스템 장착에 따른 차량 주행저항성 평가

시스템의 장착으로 인한 철도차량의 주행 저항 증가를 확인하기 위해 상용 유한요소 해석프로그램 ANSYS V.13.0 Fluent를 이용해 유동해석을 수행하였다. 유동조건은 대전도시철도 1호선의 최대운행속도인 80 km/h를 적용하였으며, 루프부에 설치되는 시스템은 설계한계를 고려하여 960 mm(폭)×450 mm(높이)×1,200 mm(길이)의 박스형상으로 루프부에 기존 설치되어 있는 에어컨박스과 유사한 형태로 모델링 하였다.

유동해석결과 시스템이 장착되지 않은 철도차량의 경우 최대 1.21 kPa의 풍압을 받으며, 전두부에서 최대속도 48.15 m/s의 유동이 발생하였다. 시스템이 장착된 철도차량은 최대 1.23 kPa의 풍압을 받으며, 전두부에서 최대속도 49.34 m/s의 유동이 발생됨을 확인하였다. 또한 철도차량의 주행저항은 일반적으로 식 (1)과 같이 다비스식(Davis equation)의 형식으로 표현되며 이때 R은 주행저항(kN), V는 열차의 속도(km/h), a, b는 기계적 저항, c는 공기저항에 따라 결정되는 상수로 알려져 있으며^[10] 타행시험을 통해 도출되며 국내 전동차에 쓰이는 주행저항식의 계수는 지하철의 경우 a는 1.867, b는 0.0359, c는 0.000745를 적용한다^[11].

$$R = a + bV + cV^2 \quad (1)$$

식 (1)을 통해 대전 도시철도 1호선의 주행저항은 약 9.51 kN임을 확인하였으며, 유동해석 결과를 힘으로 환산하면 시스템을 장착하지 않은 경우 13.33 kN, 시스템을 장착한 경우 13.35 kN이다. 이때 해석결과와 식 (1)을 통한 계산 결과의 차이는 식 (1)에서 대전 도시철도 1호선 철도차량의 형상이 고려되지 않았기 때문으로 판단된다.

식 (1)을 통한 결과와 비교한 해석결과와의 차이는 시스템을 장착한 경우가 약 2.31% 주행저항이 높은 것을 확인하였으며 이는 시스템을 장착함에 따른 주행저항성 증가량은 매우 미비하여 시스템 적용 타당성을 검증하였다. 터빈의 구동효율을 높이기 위해서는 풍압이 가장 높게 발생하는 전두부에 본 시스템을 적용하는 것이 타당하지만, 이미 운행중인 차량을 대상으로 하고 있는 제한 조건과 유입된 공기에 대한 배출의 어려움 및 전두부 전장품과의 간섭으로 인해, 차량상부에 장착되도록 설계하였다.

Fig. 2는 플라이휠 에너지 저장시스템(FESS)이 장착되지 않은 차량에 주행시 발생하는 풍압 결과를 보여주고, Fig. 3은 플라이휠 에너지 저장시스템(FESS)이 장착된 차량의 주행시 발생하는 풍압 결과를 보여준다.

2.3 시스템 설계

2.3.1 발전기 용량 선정

시스템을 활용하여 생산한 전력은 휴대전화 충전, Wi-Fi 모듈

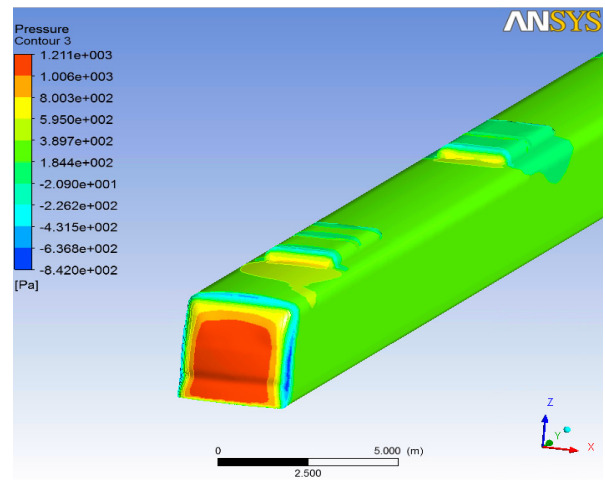


Fig. 2 Results of flow analysis without FESS

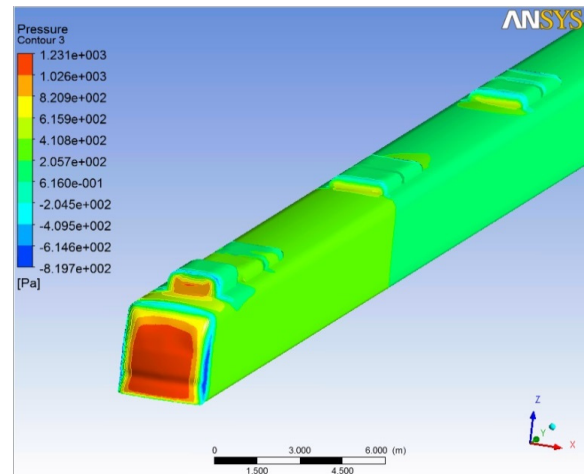


Fig. 3 Results of flow analysis with FESS

전원 등의 객차 내부의 고객 서비스 전력이나 축전지 충전을 통한 역사 내부의 보조전원 공급을 목표로 하여 1대의 전력량이 4 W인 휴대전화 약 15대를 충전할 수 있도록 60 W를 기준으로 발전기를 선정하였다. 발전기는 크게 초기 구동력이 낮으며 낮은 코킹토크와 낮은 출력을 갖는 AFPM (Axial Flux Permanent Magnet) 방식, 그리고 높은 초기 구동력을 필요로 하며 높은 코킹토크와 높은 출력을 갖는 RFPM (Radial Flux Permanent Magnet) 방식으로 구분되는데, 본 연구에서는 높은 코킹토크를 갖더라도 출력과 효율면에서 장점을 갖는 RFPM방식의 발전기를 선정하였다. 발전기는 700 rpm 구동시 300 W의 전력을 생산할 수 있는 상용화된 발전기를 선정하였다.

2.3.2 풍력터빈 설계

효율적인 발전기의 구동을 위해서는 주행풍을 회전 운동에너지로 변환시켜주는 터빈이 높은 효율을 갖도록 설계를 수행해야 한

다. 풍력터빈은 바람의 속도, 설치위치, 그리고 발전기 저항 등을 고려하여 형상 및 형태를 선정해야 한다. 본 연구에서는 터널 안에 주행하는 철도차량 루프부에 설치되어 고속의 풍력원을 공급할 수 있기 때문에 바람의 방향과 회전축이 수평한 수평축 터빈을 선정하였다.

이때, 유입되는 공기의 속도를 증가시키기 위해 벨마우스 형태의 입구를 적용하였다. 초기 공기가 유입되는 입구직경은 380 mm, 터빈축 직경은 250 mm로 설계하여 풍속이 약 2.4배 증가하도록 하였다. 이때 입구직경(D)은 설계한계를 고려하여 선정하였으며 풍속은 식 (1)의 연속방정식을 통해 구하였다. Fig. 4는 벨마우스 형태의 입구의 형상을 보여준다.

$$A_1 V_1 = A_2 V_2 \quad (2)$$

여기서, A는 단면적, V는 유속을 나타내고, 아래 첨자 1과 2는 각각 입구와 출구를 의미한다.

터빈의 블레이드 수에 따른 회전운동 효율성을 평가하기 위해서, 커버 직경(250 mm)에 부합하는 직경 240 mm의 3매 블레이드 터빈과 10매 블레이드 터빈을 선정하여 유동성 평가를 수행하였다. 유동성 평가를 위해 상용 유한요소 해석프로그램 ANSYS V.13.0 CFX를 사용하였으며, 유동해석에 사용된 지배방정식은 식 (2)와 같이 Navier-Stokes 방정식을 사용하였다.

$$\rho \frac{D\bar{V}}{Dt} = -\nabla P + \mu \nabla^2 \bar{V} + \rho g \quad (3)$$

여기서, ρ 는 유체의 밀도, V는 유속, t는 시간, P는 압력, μ 는 점성률 그리고 g는 중력가속도를 나타낸다. 입구 풍속은 대전도시철도 1호선의 표정속도인 40 km/h로 적용하였으며, 터빈의 회전속도는 발전기의 300 W 출력 회전속도인 700 rpm의 1/3 속도로 차후 장착될 기어비 3:1의 타이밍 풀리의 영향을 고려하여 233 rpm으로 설정하였다. 이때, 벽면과 점착조건을 고려하였으며 후류는 개방모드로 설정, 기온은 25°C로 하여 해석을 수행하였다. 해석결과 3매 블레이드 터빈의 경우 최대 0.957 kPa의 풍압이 가해졌고, 10매 블레이드 터빈은 최대 3.072 kPa의 풍압이 가해져 10매 블레이드 터빈이 3매 블레이드 터빈보다 약 3.2배 높은 풍압을 획득할

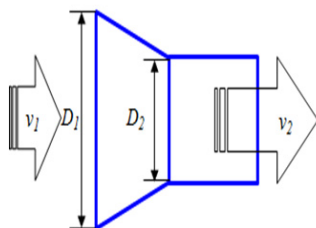


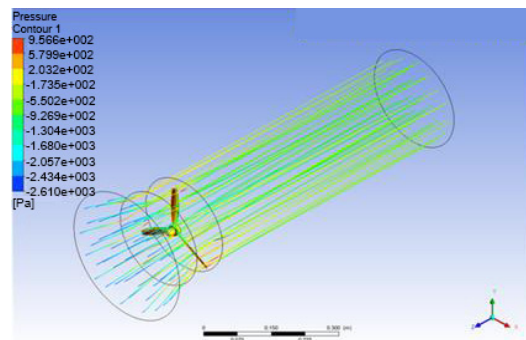
Fig. 4 Shape of entrance of air

수 있음을 확인하였다. 따라서 커버의 터빈축 직경에 부합하며 높은 풍력에너지를 획득할 수 있는 10매 블레이드 터빈을 선정하였다. Fig. 5는 터빈 블레이드 수에 따른 유동해석 결과를 보여준다.

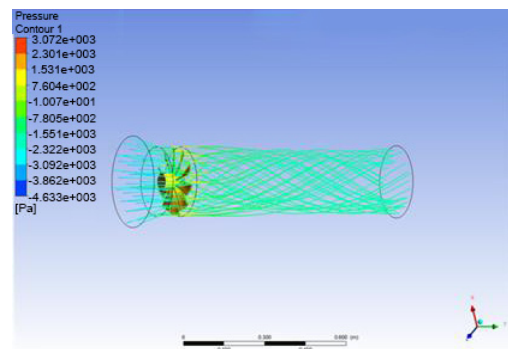
2.3.3 플라이휠 설계

플라이휠에 저장되는 에너지는 관성모멘트가 클수록 높은 에너지를 저장할 수 있기 때문에 높은 관성모멘트를 갖는 형상으로 설계하는 것이 중요하다. 플라이휠은 설계 한계와 기타 장치들의 크기 및 조립 위치를 고려하여 외경 260 mm, 내경 200 mm, 중심부 두께는 60 mm, 길이 150 mm, 질량 약 32 kg으로 선정하였으며 고속 회전운동 하는 물체가 힘을 받아 세차운동을 하게 되는 자이로스코프 현상을 억제하기 위해 플라이휠의 외경측에 질량이 집중되는 형상으로 설계하였으며, 0.2642 kgm²의 관성모멘트에 의해 최대 710 J의 에너지를 저장할 수 있도록 설계하였다. Fig. 6은 플라이휠의 형상을 보여주며 플라이휠에 저장되는 에너지는 식 (3)에 의해 결정하였다. 이때 E는 플라이휠에 저장되는 에너지, m_a는 축 질량, r_a는 축 반지름, m_f는 플라이휠 질량, r_f는 플라이휠 반지름, 그리고 ω 는 각속도를 나타낸다.

$$E = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{2} m_a r_a^2 + \frac{1}{2} m_f (r_a^2 + r_f^2) \right] \omega^2 \quad (4)$$



(a) Wind pressure for 3-Blade turbine



(b) Wind pressure for 10-Blade turbine

Fig. 5 Results of flow analysis with number of turbine blade

풍력터빈과 발전기의 기어비 3:1의 타이밍 폴리를 이용해 플라이휠의 회전속도가 3배로 증가하도록 하였다. 이때, 철도차량이 가속 또는 정차하여 풍력이 감소하거나 차단되어도 플라이휠에 의한 구동이 계속될 수 있도록 터빈측 타이밍폴리에 일방향 베어링을 장착하여 회전을 지속할 수 있도록 하였다.

2.3.4 시스템 구조 안전성 평가

설계된 시스템의 구조적 안전성을 평가하기 위해 구조해석을 수행하였다. 구조해석은 최대 회전속도인 700 rpm 구동시 축과 플라이휠의 안전성 평가와 시스템을 철도차량의 루프부에 장착하였을 때 철도차량의 구조 안전성을 평가하였다. 이때, 시스템을 장착하였을 때의 차량 구조안전성은 도시철도차량 안전에 관한 규칙에 의거하여 평가하였다.

플라이휠의 구조해석은 최고 운행속도 80 km/h를 기준으로 700 rpm 구동시의 각속도를 부여하였으며 축의 양 끝을 구속하여 구조

해석을 수행하였다. 평가 결과, 회전운동상태에서 플라이휠 체결 구동축의 최대 처짐은 0.02 mm로써, 최대 속도의 회전운동상태에서 구조적으로 안전한 것을 확인하였다. 에너지 저장시스템의 차체 장착에 따른 차체 구조해석은 철도안전법에 의거하여 수행하였으며 구조해석 결과, 솔바(언더프레임과 사이드프레임이 접합되는 부분)의 최대처짐은 두 경우 모두 볼스터간 거리의 1/1000인 13.82 mm 이하인 11.64 mm로 기준에 만족하였고, Von-Mises 응력은 미장착의 경우 11.67 MPa, 장착의 경우 13.00 MPa로 두 경우 모두 재료의 항복응력 이하로 나타나 강성과 강도 측면에서 안전함을 확인하였다. 위에서 나타난 주요 부품의 설계사양 선정 및 해석적 검증을 기반으로 최종 설계된 플라이휠 에너지 저장시스템의 형상과 실제 제작된 시스템을 Fig. 7에 보여주고 있다.

3. 에너지 저장시스템의 성능 평가

제작된 에너지 저장시스템의 성능평가를 위해서 철도차량의 주행환경을 모사한 풍동시험을 수행하였다. 시험에 사용된 풍동은 한국과학기술원의 저속풍동을 사용하였고, 이 풍동은 개방형이며 10 m/s에서 70 m/s의 속도 범위로 가동할 수 있다. 안정적인 풍동시험을 위해서 본 시스템의 하단부는 풍동장비에 고정할 수 있도록 하였다. Fig. 8은 풍동 장비에 설치된 시스템의 모습을 보여준다.

터빈의 회전운동에 의해 발전기에서 생산된 전력은 Yokogawa 사의 WT210 모델을 사용하여 측정하였으며, 최초 0 km/h에서 가속하여 대전도시철도 1호선의 최대 운행속도인 80 km/h로 풍속을 높여 시험을 수행하였다.

시험결과, 가속구간에서 발전량이 상승하나 조금의 지연이 발생함을 확인하였으며 이는 플라이휠의 관성에 의한 것으로 판단된다. 풍속이 80 km/h에 도달 후 약 4초 후에 최대 발전량에 도달하였으며, 감속구간 직전까지 최대 발전량을 유지하였다. 감속구간부터 약 36초간 전력생산이 유지됨을 확인하였다. 플라이휠이 장착되지 않은 시스템의 경우 가속구간에서 빠른 회전으로 최대발전량 도달 시간이 짧으나 감속구간이 시작되는 지점부터 급격하게 발전량이 감소하는 것을 확인하였다. 한 구간에서의 총 발전량을 비교한 결과, 플라이휠이 장착된 시스템은 140초 동안 약 146.54 Wh, 플라이휠이 장착되지 않은 시스템은 110초 동안 약 101.67 Wh의 전력량을 생산하였으며 이는 플라이휠이 장착된 시스템이 약 44.13% 더 많은 전력량을 생산하는 것을 확인하였다. Fig. 9는 풍동시험을 통해 발전된 전력량을 보여준다. 대전 도시철도 1호선의 2분 주행, 30초 정차의 운행패턴을 적용하여 시험을 수행한 결과 플라이휠을 장착한 시스템은 정차구간 동안 주행 중 제공하던 전력량만큼 지속적으로 생산하지 못하였지만 감속구간 진입 후 약 36초간 전력생산이 유지되는 것을 확인하였다. 또한 최대 전력생산 구간에서 약

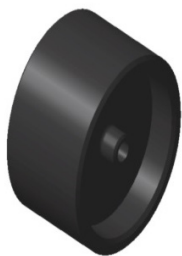
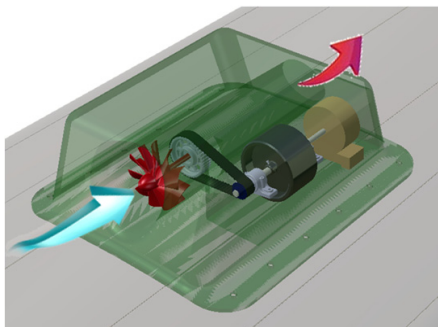
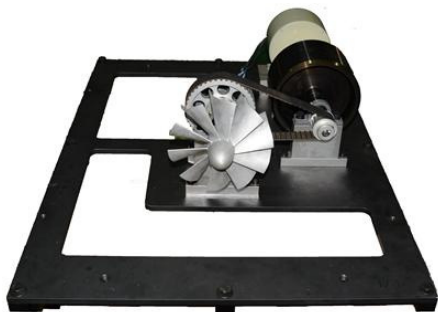


Fig. 6 Shape of flywheel



(a) Design concept



(b) Product shape with mounted jig

Fig. 7 Flywheel energy storage system (FESS)



(a) Test equipment



(b) FESS installed in wind tunnel

Fig. 8 Wind tunnel test

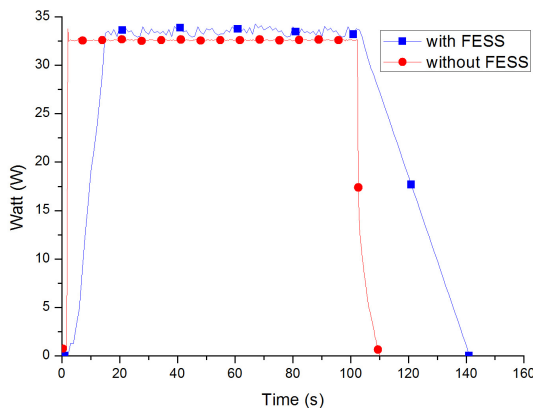


Fig. 9 Generated power of FESS by wind tunnel test

34 W의 전력을 생산하여 휴대전화 충전 및 Wi-Fi 모듈 전원공급 등의 객차 내 고객 서비스 전력 공급이 가능한 것을 확인하였다.

4. 결론

본 논문에서는 철도차량의 주행시 발생하는 주행풍을 이용하는 터빈형 플라이휠 에너지 저장시스템을 개발하였다.

개발된 플라이휠 에너지 저장시스템은 도시철도차량의 주행 중 발생하는 주행풍을 이용하여 에너지를 생산 및 저장할 수 있도록 설계되었으며, 700 rpm 구동시 300 W의 전력을 생산하는 RFPM 방식의 발전기를 적용하여 최대 710 J의 에너지가 플라이휠에 저

장될 수 있도록 고안되었다. 또한, 입력되는 풍속의 증가를 위해 벨마우스 구조의 흡입구를 적용하였고, 철도차량의 감속이나 정차 시에도 지속적으로 플라이휠이 회전할 수 있도록 터빈축 풀리에 일방향 베어링을 설치하였다.

시스템 장착에 따른 차체의 구조적 안전성을 평가하기 위해 철도 안전법에 의거하여 구조해석을 수행하였으며 시스템의 구동축 및 차체 결합에 대한 구조적 안전성도 확인하였다. 또한, 유동해석을 통해 시스템 장착으로 인해 증가하는 주행저항성이 매우 미비한 것을 확인하였다. 또한 개발된 시스템의 작동특성과 성능 검증을 위해 풍동시험을 수행하여, 주행 시나리오를 따라 발생하는 바람을 통해 전력을 생산하며 감속구간부터 약 36초간 전력생산이 지속되어 약 11%의 효율을 가짐을 확인하였다.

본 연구를 통해 개발된 터빈형 플라이휠 에너지 저장시스템은 주행풍에 의한 에너지를 수확 및 저장할 수 있는 시스템으로써 생산되는 에너지는 컨버터를 통해 객차 내의 모바일기기의 충전, Wi-Fi 모듈 전원, 전등 등의 보조전원으로 사용될 수 있고, 축전기 충전을 통해 저장되는 에너지는 역사 내의 보조 에너지로도 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

References

- [1] Jung, J. H., 2004, The Competitiveness and Politic Implications in Wind Energy Industry, Conference of The Korean Institute of Power Electronics 506-510.
- [2] Kim, J. I., Yoo, T. H., 2012, A Critical Review on the Greenhouse Gas Emission Trading Schemes, Korea Social Science Institute 85 330-357.
- [3] Amodeo, S. J., Chiacchiarini, H. G., 2009, High-Performance Sensorless Nonlinear Power Control of a Flywheel Energy Storage System, Energy Conversion and Management, 50 1722-1729.
- [4] Okou, R., Sebitosi, A. B., 2011, Flywheel Rotor Manufacture for Rural Energy Storage in Sub-Saharan Africa, Energy 36:10 6138-6145.
- [5] Han, Y. J., Ren, Zhengyi., 2012, General Design Method of Flywheel Rotor for Energy Storage System, Energy Procedia, 16 359-364.
- [6] Lee, H. I., Yoo, S. Y., Lee, J. E., Noh, M. G., 2008, Design of Micro Flywheel Energy Storage System, Proceedings of The Korean Society of Mechanical Engineers Spring Conference 82-85.
- [7] Mo, S. S., Yoo, S. Y., Lee, J. P., 2006, Magnetic Levitation Design for 100kWh Class Flywheel Energy Storage System, Proceedings of The Korean Society of Mechanical Engineers Spring Conference 7-12.
- [8] Kim, G. D., Kim, J. D., Lee, H. M., 2005, Development of Recycle Energy Storage System on Electric Rail Car, Proceedings of The Korean Society For Railway Autumn Conference 24-28.

- [9] Jang, H. J, Shin, K. B, Lee, S. H., 2010, A Study on Structural Integrity and Dynamic Characteristic of Inertial Load Test Equipment for Performance Test of Railway Vehicle Propulsion Control System, *Journal of The Korean Society For Railway* 13:4 363-370.
- [10] Oh, H. K., Kwon, H. B., Kim. S. S., 2013, The Running Resistance Characteristic of Next Generation High Speed Train (HEMU-430X), *Proceedings of The Korean Society For Railway Autumn Conference* 867-871.
- [11] Lee, J. A., Kim, E. C., Kim, D. H., 2012, Study of Running Resistance for ITX Train, *Proceedings of The Korean Society For Railway Autumn Conference* 1188-1192.