

전기자동차 레인지익스텐더를 위한 초소형 가스터빈 파워팩의 전기 부하 및 동력전달 기어비에 따른 성능 실험

심 규 호^{*†} · 박 지 수^{*}

* 서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과

Measurement of Micro Gas Turbine Power Pack Performance for Electric Vehicle Range Extenders Under Various Electrical Loads and Gear Ratios

Kyuho Sim^{*†} and Jisu Park^{*}

* Dept. of Mechanical System Design Engineering, Seoul Nat'l Univ. of Sci. & Tech.

(Received November 18, 2014 ; Revised December 26, 2014 ; Accepted January 17, 2015)

Key Words: Micro Power Pack(초소형 파워팩), Micro Gas Turbine(초소형 가스터빈), Electric Vehicle(전기 자동차), Range Extender(거리증대기)

초록: 전기자동차 레인지 익스텐더는 소형 엔진으로 구동되는 발전기 시스템(초소형 파워팩)으로서 자동차 운행 중 지속 충전을 통하여 운전 거리 및 시간을 연장한다. 기존 가솔린 엔진 파워팩은 복잡한 구조와 낮은 에너지 밀도로 인하여 고효율 소형 시스템 구현에 한계가 있다. 반면, 가스터빈 파워팩은 출력밀도가 매우 높고 고속화를 통해 시스템의 소형화가 가능하다. 본 연구에서는 전기자동차 레인지 익스텐더로 활용하기 위하여 초소형 가스터빈, 자동차용 알터네이터, 배터리를 사용한 초소형 가스터빈 파워팩 실험장치를 개발하고, 무부하 및 부하 조건에서 동력전달 기어비 및 알터네이터 전기부하에 따른 운전 특성 및 발전 성능을 측정하였다. 실험 결과, 부하 변화에 따른 발전 성능의 변화는 없었으며, 코어터빈 속도가 150 krpm 일 때 최대 전기적 출력은 0.8 kW 로 측정되었다. 또한, 동력축의 3:1 감속을 통해 전기적 출력은 1.5 kW 로 88% 증가하였다. 따라서, 본 연구의 초소형 가스터빈 파워팩은 배터리 부하 변동에 대해 안정적인 전력생산이 가능하며, 전기자동차용 레인지 익스텐더로 적용가능함을 확인하였다.

Abstract: Range extenders, which are power generation systems driven by small engines, extend the driving distance and time of electric vehicles (EVs) through continuous charging of batteries. The currently used range extenders with gasoline engines pose limitations with regard to the realization of high-power compact systems, owing to their complex structure and low energy density. In contrast, micro gas turbine (MGT) range extenders (MGT power packs) possess high power and low weight, and can therefore be significantly reduced in size despite increase in speed. In this study, an MGT power pack for the range extenders of EVs was developed using a turbo-prop micro turbine, an alternator for passenger vehicles and electric batteries. The operating characteristics of the MGT power pack were measured through a series of experiments conducted under electrical no-load and load conditions. Their power generation performance and efficiency were measured under various electrical loads and power transmission gear ratios. From the results, electrical load was found to have no influence on power generation performance. The maximum electrical power output was 0.8 kW at a core turbine speed of 150 krpm, and the application of 3:1 reduction gear to the turbine output shaft increased the power to 1.5 kW by 88%. This implies that the test results demonstrated stable power generation performance of the MGT power pack regardless of vehicle load changes, thus revealing its feasibility for use with the range extenders of EVs.

1. 서론

최근 고유가 시대와 환경오염의 문제로 전기차

자동차의 필요성이 증가하면서 연구 개발의 중요성이 증가하고 있다. 하지만, 전기자동차(Electric vehicle, EV)는 짧은 주행거리 및 주행시간으로 인하여 본격적인 확산이 제한되고 있다. 반면, 주행거리 확장형 전기자동차(EVs with range extender)는

† Corresponding Author, khsim@seoultech.ac.kr

© 2015 The Korean Society of Mechanical Engineers

내연기관을 주 엔진으로 하는 일반 하이브리드 전기자동차(Hybrid EV, HEV)와 달리 순수한 배터리 구동 전기자동차에 레인지 익스텐더(Range extender, RXT)를 장착하여 운행 중 지속적인 발전 및 충전으로 장시간, 장거리 운전을 가능하게 하고, 배터리 중량 및 비용을 크게 감소한다. 레인지 익스텐더는 플러그인 하이브리드 전기자동차(Plug-in HEV, PHEV)와 같이 시내 주행과 같은 짧은 거리의 운전은 외부에서 충전된 배터리 전력을 사용하고, 장거리 운전 시 레인지 익스텐더를 사용하여 지속 충전한다. PHEV는 HEV보다 연료 사용량과 CO₂ 배출량을 줄일 수 있다고 보고되었다.⁽¹⁾

기존 PHEV는 가솔린 엔진에 기반한 레인지 익스텐더를 주로 채용하고 있다. 미국 GM의 VOLT는 배터리 사용 시 65 km를 주행할 수 있으며, 필요 시 1400cc의 가솔린엔진 레인지 익스텐더로 배터리를 지속적으로 충전하여 리터 당 35 km를 주행할 수 있다.⁽²⁾ 독일 BMW사는 2013년 레인지 익스텐더를 채용한 전기자동차 i3를 공개했다. i3는 한번 충전으로 약 160km를 주행할 수 있으며, 650cc 가솔린엔진 레인지 익스텐더를 장착하면 주행거리를 300km까지 늘릴 수 있다.⁽³⁾ 그 외 레인지 익스텐더를 장착한 전기자동차는 한국 쌍용자동차의 코란도 C EV-R, 일본 SUZUKI SWIFT 등이 있다. 가솔린 엔진 레인지 익스텐더는 낮은 에너지 밀도로 인하여 소형으로 고효율을 내는 초소형 파워팩 구현에 한계가 연료 사용에 제한이 있으며, 배기가스의 환경오염에 대한 우려가 존재한다.

초소형 가스터빈을 이용한 레인지 익스텐더는 연소에 의한 고온 열유동에너지를 이용하는 외연기관으로서 바이오연료, 액화석유가스(LPG), 압축천연가스(CNG)와 같은 가격이 저렴하고 다양한 친환경 연료를 사용할 수 있다.⁽⁴⁾ 또한, 비슷한 출력의 내연기관에 비해 중량이 매우 작고 고속화를 통한 소형화가 가능하며,⁽⁵⁾ 특히 탄소 배출을 ~30%, 이산화질소 배출을 ~50% 감소시킴으로써 친환경적이며 단순 구조로 유지보수가 쉽다.⁽⁶⁾ 특히, 가스터빈 레인지 익스텐더는 소형화 및 경량화가 가능하므로, 기존 가솔린 엔진에 비하여 콤팩트한 패키징이 가능하다.

가스터빈 엔진 레인지 익스텐더에 대한 연구로 뉴질랜드의 DesignLine Corporation은 미국 캡스톤사의 30kW 초소형 가스터빈 발전기(MGT generators)를 전기버스의 배터리를 충전시키기 위해 사용했다.⁽⁶⁾ 뉴욕의 운수부(New York Department of Transportation)에 따르면 DesignLine Corporation의

초소형 가스터빈 발전기(MGT generator)로 충전되는 전기버스는 디젤버스와 비교하여 50%의 연비 향상이 있다고 보고했다.⁽⁷⁾ 김재환 등⁽⁸⁾은 레인지 익스텐더의 출력과 자동차 주행 거리에 대해 분석을 통하여 도심에서 전기자동차 운전 시 필요한 레인지 익스텐더 출력은 대부분 10 kW 이하임을 제시하였다. Sim 등⁽⁸⁾은 소형 전기자동차 적용을 위한 10 kW 미만의 경제성 있는 레인지 익스텐더 개발을 위하여 레저용 터보프롭(Turboprop)형 초소형 가스터빈과 자동차용 알터네이터를 사용하여 초소형 가스터빈 파워팩(Micro gas turbine power pack)을 개발하고, 성능 실험 및 분석을 수행하였다. 연구 결과, 초소형 가스터빈 파워팩은 다른 내연기관 파워팩에 비하여 4 배 이상의 높은 출력밀도를 얻었다. 하지만, 알터네이터의 과도하게 높은 전기적 부하는 가스터빈 출력에 비해 현저히 낮은 발전 출력을 유발함으로써 최적화의 필요성을 보여주었다.

본 연구에서는 초소형 가스터빈, 자동차용 알터네이터, 배터리로 구성된 초소형 가스터빈 파워팩(MGT power pack) 실험장치를 개발하고, 1 kW 이상의 안정적인 발전 성능을 측정함으로써 전기자동차용 레인지 익스텐더 적용 가능성을 평가하였다. 또한, 가스터빈의 유량, 온도, 회전속도 등의 측정 데이터를 기반으로 운전 특성을 평가하고, 동력전달 기어비 및 알터네이터 전기부하에 따른 가스터빈-발전기의 최적 출력 및 효율에 대해 고찰하였다.

2. 실험 장치

2.1 초소형 가스터빈

Fig. 1은 본 연구에 사용된 2축 파워터빈 방식의 초소형 가스터빈(Jetcat SPT5, Germany)을 보여준다. 초소형 가스터빈은 코어터빈부(Core turbine, CT), 파워터빈부(Power turbine, PT), 기어박스(Gear box), 파워축(Power shaft, PS)으로 구성된다. 전체 질량과 크기는 각각 2.5 kg, 387 mm × 140 mm이다. 코어터빈부는 1 단 축류 터빈과 원심 압축기, 연소기로 구성되며, 최대 170 krpm으로 회전하면서 710 °C의 배기가스와 7.5 kW의 출력을 발생시킨다. 파워터빈부는 1 단 축류 터빈과 배기구로 구성되며, 최대 70 krpm으로 회전한다. 기어박스는 파워터빈부에서 파워축으로 동력을 전달하며 회전속도를 8:1로 감속한다. 코어터빈부와 파워터빈부의 회전축은 분리되어 있어 파워터빈의 부하 변동에 대하여 코어터빈은 안정적으로 작동한다. 시동 모터(Starting motor)는 시동 시 코어터빈을 일정 속

Table 1 Specification of test MGT for micro power pack⁽¹⁰⁾

Weight	2.5 kg
Size	387 mm×140 mm
Max. power	7.5 kW (core turbine) 170 krpm (core turbine)
Max. speed	70 krpm (power turbine) 8.75 krpm (power shaft)
Max. exhaust gas temperature	710 °C (core turbine)
Fuel	Kerosene
Lubricant	5% synthetic turbine oil
Gear ratio	8 (gear box)

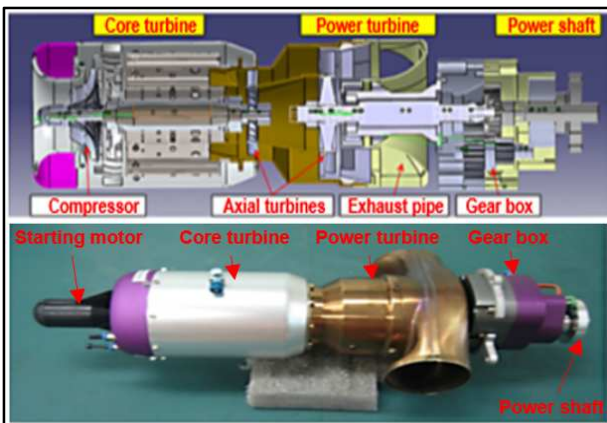


Fig. 1 Configuration of 7.5 kW turbo-prop MGT for micro power pack⁽⁹⁾

도로 회전시키고, 정지 시 코어터빈을 냉각시키는 역할을 한다. 엔진제어부(Engine control unit, ECU)는 코어터빈 회전속도 및 배기 온도, 입력 연료 유량, 파워터빈 회전속도를 측정 및 제어한다. 연료는 등유(Kerosene)가 사용되며 펌프에 의해서 연소기로 주입된다. Table 1 은 초소형 가스터빈의 상세 제원을 보여준다.

2.2 알터네이터 및 배터리

Fig. 2 은 본 연구에 사용된 자동차용 알터네이터(Bosch ALT-2118)의 사진과 회전속도에 따른 출력 전류를 나타낸다. 알터네이터는 정류된 직류 전류를 발생시키며 회전속도가 1200 rpm 이상에서 출력전류가 발생한다. 최대 출력 전압과 전류는 28 V_{dc}/110 A_{ac}이며 약 3.1 kW의 전기에너지를 발생시킨다.⁽⁹⁾ 충전용 배터리(ATLASBX BX90R)의 용량은 12 V_{dc}, 90 A_{ac}h이며 알터네이터의 출력 전기 에너지를 저장하고 부하에 의해서 전기에너지를 소모한다. 본 연구에서는 배터리 2개(24 V_{dc})를 직렬로 연결하여 사용하였다. 특히 알터네이터에 배터리 전압이 인가되어 알터네이터는 작동되며 본

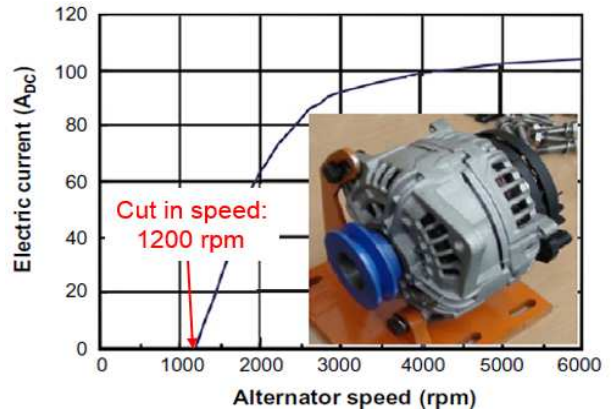


Fig. 2 Electric output current versus rotating speed of test alternator⁽⁹⁾

실험에 사용한 알터네이터는 배터리 전압이 28 V_{dc} 이상(배터리 완충)이 되면 작동하지 않도록 제어 된다.⁽¹¹⁾

2.3 초소형 가스터빈 파워팩

Fig. 3 은 초소형 가스터빈, 자동차용 알터네이터, 배터리로 구성된 초소형 가스터빈 파워팩 실험장치를 보여준다. 초소형 가스터빈과 토크센서, 알터네이터는 연성 커플링(R+W BKL-20)으로 연결된다. 연성 커플링의 허용 토크와 회전속도는 각각 20 N·m, 30 krpm이며, 연성 커플링을 사용함으로써 파워축과 알터네이터축의 회전 진동을 분리하고 두 축의 정렬불량(Misalignment)을 보상할 수 있다.⁽¹²⁾ 가변 부하저항은 알터네이터와 연결된 배터리에 병렬로 연결되어, 배터리 전력을 소모하는 동력 모터를 모사한다.

Fig. 4 은 초소형 가스터빈 파워팩의 발전 성능 및 운전 특성 평가를 위한 센서 구성을 나타낸다. 초소형 가스터빈부는 엔진제어부에 의해 코어터빈 회전속도, 코어터빈 출구 온도가 측정된다. 코어터빈 회전속도와 출구 온도는 초소형 가스터빈의 운전 시퀀스(Operating sequence) 파악 및 초소형 가스터빈 파워팩 성능 평가에 사용된다. 그리고 알터네이터 입력단에서는 타코미터(MONARCH ACT-3X)로 회전속도를 측정하며 토크센서(세경하이테크 YDNR-30K)로 토크를 측정한다. 알터네이터 출력단에서는 전류전압계(MK ELEC DDA/V-132A52)로 알터네이터 출력 전류, 전압을 측정한다.

3. 실험 결과

초소형 가스터빈 파워팩 실험은 크게 운전 특성 실험, 부하 저항에 따른 출력 특성 실험, 동력전달 기어비에 따른 출력 특성 실험으로 구성된다.

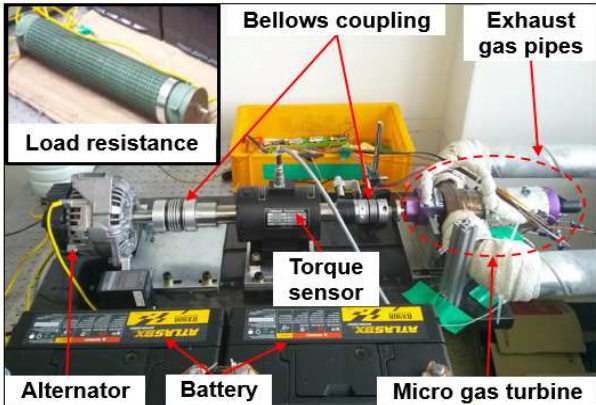


Fig. 3 Test rig of MGT power pack composed of micro turbine, vehicle alternator, batteries, and load resistance with various sensors

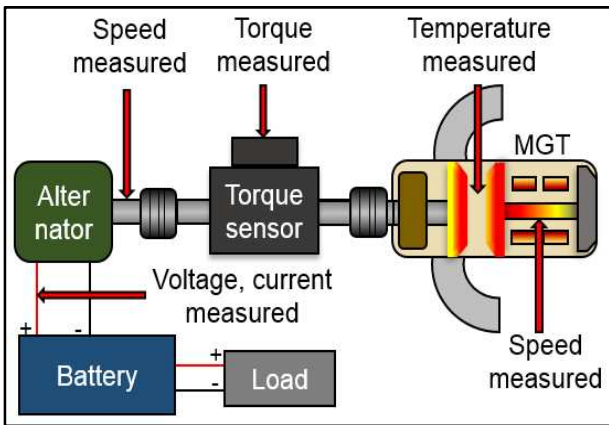


Fig. 4 Schematic of sensor configuration

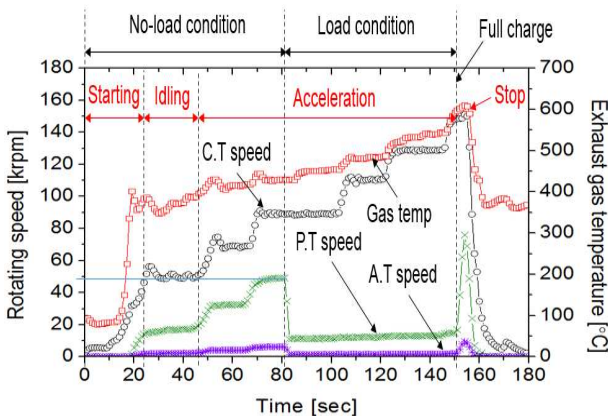


Fig. 5 Measured rotating speeds of core turbine, power turbine, and alternator, and exhaust gas temperatures under no-load and load conditions

3.1 파워팩 운전 특성

운전 특성 실험은 실제 PHEV 레인지 익스텐더의 운전 시퀀스를 모사하기 위하여, 가스터빈 시동 - 무 부하(No load) 운전 - 배터리 연결 - 부하(Load) 운전 - 배터리 충전/완충 - 가스터빈 정지의 과정으로 구성된다. 무 부하 조건에서 코어터

빈 속도는 50 krpm - 90 krpm 까지 20 krpm 간격으로 가속하고, 부하 조건에서 부하 저항은 1Ω이며, 코어터빈은 150 krpm 까지 운전한다. 여기서 무 부하 조건은 발전기에 전류가 흐르지 않는 상태이며, 부하 조건은 발전기의 출력 회로가 연결되어 전기적 출력이 발생하는 상태이다.

Fig. 5 은 초소형 가스터빈 파워팩 운전 시퀀스의 무 부하 및 부하 조건에서의 코어터빈 속도, 파워터빈 속도, 알터네이터 속도, 코어터빈 배기가스 온도 측정 데이터이다. 시동 초기에 시동모터에 의해 코어터빈은 5 krpm 으로 회전하며 연소기에서 점화가 시작되면서 코어터빈은 50 krpm 으로 공회전(Idleing) 상태가 된다. 이후 코어터빈을 90 krpm 까지 가속시켰으며 이때의 파워터빈 속도, 알터네이터 속도, 코어터빈 배기가스 온도는 각각 49 krpm, 6 krpm, 430°C 이다. 81 sec(코어터빈 속도: 90 krpm)에 발전기 출력 회로를 연결하여 부하 조건으로 운전 시켰으며 파워터빈 속도, 알터네이터 속도, 코어터빈 배기가스 온도는 각각 ~11 krpm, ~1.4 krpm, ~430°C 이다. 부하 조건에서 발전기의 부하에 의해 파워터빈과 알터네이터 회전속도가 약 1/4 로 감소함을 알 수 있으며, 코어터빈과 파워터빈은 서로 독립적이기 때문에 코어터빈 배기가스 온도는 변화가 없다. 그리고 150 sec(코어터빈 속도: 150 krpm)에서 배터리가 완충되어 자동적으로 알터네이터의 부하가 제거되면서 무 부하 조건이 되면서 파워터빈과 알터네이터 회전속도가 급격히 상승했다. 그 이후 엔진을 정지 시키면서 코어터빈 배기가스 온도, 코어터빈 속도, 파워터빈 속도, 알터네이터 속도가 급격히 감소하는 것을 알 수 있다.

Fig. 6 은 초소형 가스터빈 파워팩 운전 시퀀스의 무 부하 및 부하 조건에서의 알터네이터 속도, 배터리 출력 전압/전류, 전기 출력에너지¹⁾의 경향을 나타낸다. 시동 초기 배터리 전압은 24 V_{dc}이며, 무 부하 조건인 81 초 이전에서는 출력 전류가 발생하지 않는다. 부하 조건인 81 초 이후에 알터네이터 속도가 1.4 krpm 일 때 출력 전류가 발생하며, 이는 제원상의 알터네이터 출력 발생 속도(1.2 krpm) 근처이다. 부하 조건에서 최대 알터네이터 속도와 최대 배터리 전압, 최대 출력 전류, 최대 전기적 출력에너지는 각각 1.8 krpm, 27.9 V_{dc}, 29.5 A_{dc}, 0.82 kW 이다. 부하 조건에서 무 부하 조건으로 전환되는 150 sec에서 출력 전류와 전기적 출력 에너지는 급격히 감소하며, 배터리 전압은

¹⁾ 전기적 출력 에너지 = 알터네이터 출력 전류 × 출력 전압

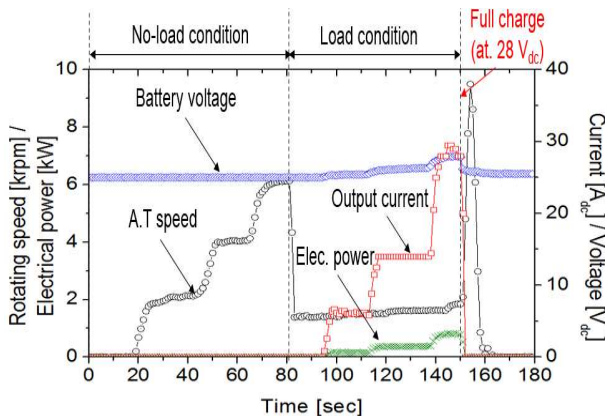


Fig. 6 Measured alternator speed, battery voltage, output current, and electrical power under no-load and load conditions

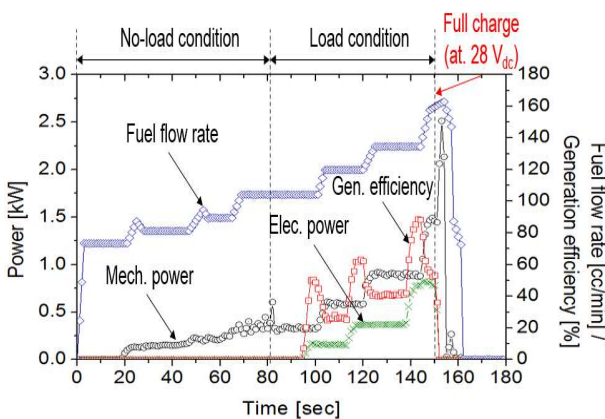


Fig. 7 Measured fuel flow rate, mechanical power, electrical power, and generation efficiency under no-load and load conditions

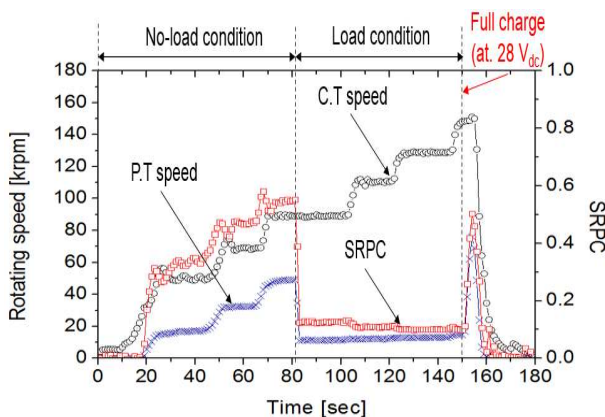


Fig. 8 Measured rotating speeds of core turbine and power turbine, and SRPC (speed ratio of power turbine to core turbine) under no-load and load condition

연결된 부하 저항에 의해서 서서히 감소한다.

Fig. 7 은 초소형 가스터빈 파워팩 운전 시퀀스의 무 부하 및 부하 조건에서의 코어터빈 연료 유량, 기계적 출력 에너지², 전기적 출력 에너지, 발

전 효율³의 경향을 나타낸다. 코어터빈 입력 연료 유량은 시동 초기 73 cc/min 에서 코어터빈 속도와 같은 경향으로 증가하며, 최대 160 cc/min 의 연료가 코어터빈의 연소기로 입력된다. 기계적 출력 에너지는 무 부하 조건에서도 발생하며 부하 조건에서 최대 1.4 kW 이다. 발전 효율은 센서간 응답 시간(Response time)의 차이 때문에 가속구간에서 크게 변하며 이후, 일정한 회전속도에서 일정한 값으로 수렴한다. 발전 효율은 회전속도 증가에 따라 증가하며 최대 58.6%이다. 부하 조건에서 무 부하 조건으로 전환되는 150 sec 에서 급격한 알터네이터 속도 증가로 기계적 출력 에너지는 급격하게 상승하는 경향이다.

Fig. 8 은 초소형 가스터빈 파워팩 운전 시퀀스의 무 부하 및 부하 조건에서의 코어터빈 속도와 파워터빈 속도, 파워터빈과 코어터빈의 속도비의 경향을 나타낸다. 무 부하 조건에서 부하 조건으로 전환될 때 파워터빈의 코어터빈의 대한 속도비는 0.55 에서 0.12 로 급격히 감소한다. 이는 알터네이터의 전기적 부하가 회전속도에 부하 감소로 작용하기 때문이다. 부하 조건에서 코어터빈 속도 증가는 파워터빈 속도와 함께 부하도 증가시켜 속도비는 서서히 감소하게 한다. 부하 조건에서 무 부하 조건으로 전환될 때 속도비는 0.1 에서 0.5 로 급격히 증가한다.

3.2 부하 저항에 따른 발전 성능

부하 저항에 따른 발전 성능 실험은 전기자동차에서 소모되는 부하 전력(예, 견인모터)을 모사함으로써 부하가 발전 성능에 미치는 영향을 측정한다. 충전 배터리와 병렬로 연결된 부하 저항은 1, 10, 20, 30 Ω이다.

Fig. 9 은 코어터빈 속도가 150 krpm 일 때, 다양한 부하 저항에서의 알터네이터 속도, 기계적 출력 에너지, 전기적 출력 에너지의 경향을 나타낸다(시간 응답 데이터 생략). 부하 저항의 변화에 대해서 알터네이터 속도, 기계적 출력 에너지, 전기적 출력 에너지는 각각 1.8 krpm, 1.4 kW, 0.8 kW 로 일정한 경향이다. 즉, 배터리에 병렬 연결된 부하 저항은 알터네이터 출력 전류에 영향을 미치지 않으며, 알터네이터 출력 전류에 비례하는 알터네이터의 부하(회전 시스템의 감쇠)도 변하지 않으므로 알터네이터 속도, 기계적 출력 에너지, 전기적 출력 에너지가 변하지 않는 것으로 판단된다. 따라서 알터네이터-배터리 발전 시스템은 부하 저

² 기계적 출력 에너지 = 알터네이터 입력 토크 × 회전속도

³ 발전 효율 = 전기 출력 에너지 / 기계 출력 에너지

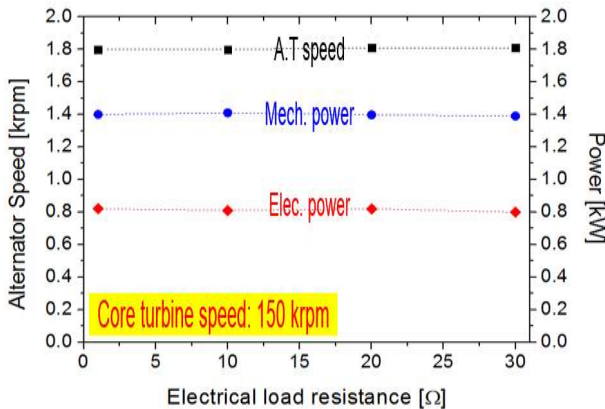


Fig. 9 Measured alternator speed, mechanical power, and electrical power with various load resistances

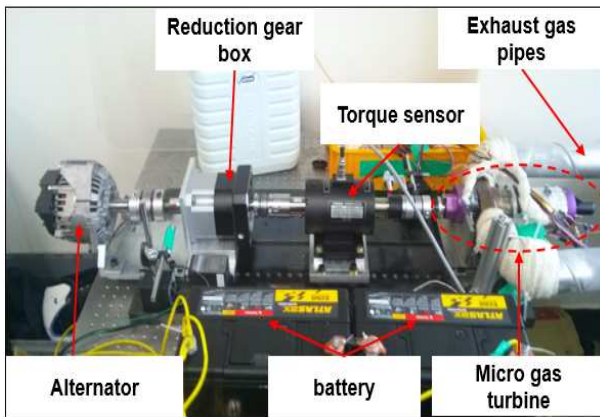


Fig. 10 Overall configuration of MGT power pack with 3:1 reduction gear

항의 크기에 영향을 받지않는 안정적인 시스템으로 판단되며, 이는 본 실험장치의 전기자동차 적용 시 알터네이터는 모터의 부하에 영향을 받지 않고 일정한 출력을 발생시킬 수 있음을 의미한다.

3.3 동력전달 기어비에 따른 발전 성능

본 실험은 초소형 가스터빈 파워팩 실험장치 (Fig. 3)에 감속기를 적용하여 동력전달 기어비 변화에 따른 출력 성능 변화를 측정하였다. 초소형 가스터빈은 비교적 낮은 토크로 높은 회전속도에서 운전되는 시스템이며, 알터네이터는 비교적 높은 토크로 낮은 회전속도에서 운전되는 시스템이다.⁽⁹⁾ 그리고 알터네이터는 회전속도에 따라서 출력 전류가 정해진다. 하지만 운전 특성 실험(Fig. 6-8)에서 알터네이터 속도는 알터네이터의 부하에 의해서 1/4 로 크게 감소하여 전기적 출력 에너지를 충분히 발생시킬 수 없음을 알 수 있다. 따라서 초소형 가스터빈의 출력 토크(=알터네이터 입력 토크)를 증가시켜 초소형 가스터빈의 출력과 알터네이터 입력의 최적화가 필요하다. 그러므로

본 실험에서는 기어 감속기를 가스터빈 출력 축 (파워 축)에 연결하여 가스터빈 출력 토크를 증가시켜서 발전성능을 평가했다. Fig. 10 은 감속기를 적용한 실험장치의 구성을 보여준다. 모든 센서의 위치는 이전의 운전 특성 실험, 부하 실험과 동일하며, 가스터빈 출력 축(알터네이터 입력)에 3:1 감속기를 연결하였다. 부하 저항은 1Ω이다.

Fig. 11 은 감속기 유, 무 조건에서 코어터빈 속도에 따른 가스터빈 출력 토크, 알터네이터 속도, 기계적 출력 에너지의 경향을 나타낸다. 가스터빈 출력 토크는 감속을 했을 때가 감속하지 않은 경우보다 크며, 코어터빈 속도 증가에 따라서 그 차이가 더 커지는 경향이다. 코어터빈 속도가 150 krpm 일 때, 감속했을 때의 가스터빈 출력토크는 15 N-m 로 감속하지 않은 경우보다 100% 증가한 것을 알 수 있다. 알터네이터 속도는 코어터빈 속도가 130 krpm 까지는 감속하지 않은 경우가 더 크지만, 코어터빈 속도가 150 krpm 에서는 감속한 경우 2.1 krpm 으로 감속하지 않은 경우보다 17% 증가하였다. 그리고 기계적 출력 에너지는 감속한 경우 코어터빈 속도증가에 따라 급격하게 증가하며 코어터빈 속도 150 krpm 에서 3.3 kW 로 감속하지 않은 경우보다 120% 증가하였다.

Fig. 12 은 감속기 유, 무 조건에서 코어터빈 속도에 따른 전기적 출력 에너지, 발전 효율의 경향을 나타낸다. 전기적 출력 에너지는 코어터빈 속도가 130 krpm 이전에서 감속하지 않은 경우가 더 크지만 코어터빈 속도 150 krpm 에서 감속한 경우 1.48 kW 로 감속하지 않은 경우 보다 80% 증가했다. 이는 감속을 통한 토크 증가로 가스터빈 출력과 알터네이터 입력이 최적화 되었기 때문이다. 발전 효율은 감속한 경우가 감속하지 않은 경우보다 낮음을 알 수 있으며 감속한 경우, 발전 효율은 코어터빈 속도 150 krpm 에서 45%로 감속하지 않은 경우보다 20% 감소했음을 알 수 있다.

Table 2 은 부하 저항에 따른 실험과 동력전달 기어비에 따른 실험에서 측정한 여러 회전속도, 입력 연료 유량, 토크, 기계적 출력 에너지, 전기적 출력 에너지, 발전 효율, 열역학적 효율, 시스템 효율을 나타내었다. 열역학 효율은 기계적 출력/연료에너지의 효율이며, 시스템 효율은 전기적 출력/연료에너지의 효율이다. 특히 감속기 적용시 SPRC(파워터빈의 코어터빈에 대한 속도비)는 알터네이터 전자기 부하토크의 감소로 약 3 배 증가하였다. 알터네이터 입력 토크, 회전축 속도는 각각 14.6 N-m, 2.12 krpm 으로 약 92%, 17% 증가하

Table 2 Summary of measured rotating speeds, MGT output torque, and alternator output power during a series of experiments with various load resistances under no-reduction and reduction conditions (core turbine speed: 150 krpm)

Load resistance (Ω)		No-reduction				Reduction (3:1)
		1 Ω	10 Ω	20 Ω	30 Ω	1 Ω
Rotating speed (krpm)	Power turbine	14.4	14.4	14.5	14.5	50.9
	Power shaft	1.8	1.8	1.8	1.8	6.36
	Alternator	1.8	1.8	1.8	1.8	2.12
Turbine speed ratio	SRPC	0.096	0.096	0.097	0.097	0.34
Torque input (N-m)	Alternator	7.6	6.9	7.4	7.6	14.6
Fuel flow rate (cc/min)		163.2	159.1	155.6	151.8	150.0
Mechanical power output (kW)		1.40	1.41	1.39	1.39	3.3
Electrical power output (kW)		0.82	0.81	0.82	0.80	1.5
Generation efficiency (%)		58.6	57.5	58.7	57.6	45.5
Thermal efficiency (%)		1.60	1.62	1.63	1.67	4.02
System efficiency (%)		0.92	0.93	0.96	0.96	1.81

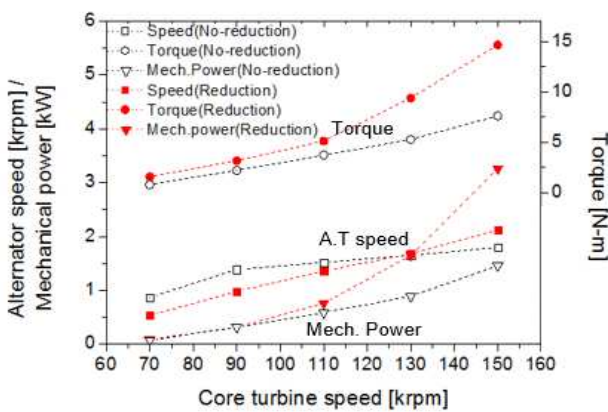


Fig. 11 Measured alternator speed, mechanical power, and MGT output torque with increasing core turbine speeds under no-reduction and reduction conditions. Load resistance: 1 Ω

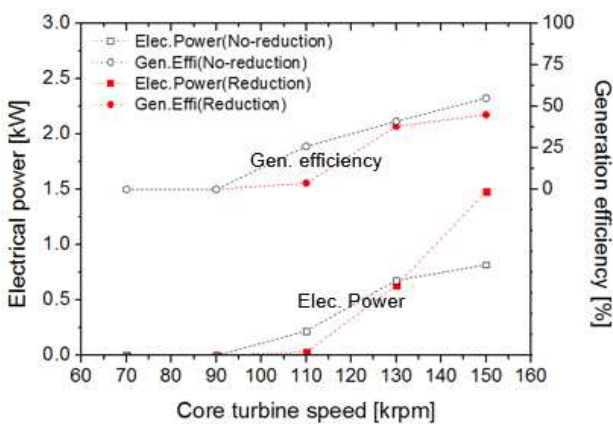


Fig. 12 Measured electrical power and generation efficiency with increasing core turbine speeds under no-reduction and reduction conditions. Load resistance: 1 Ω

였고, 결과적으로 기계 입력 동력, 전기 출력, 시스템 효율은 각각 3.3 kW, 1.5 kW, 1.81%로 약

136%, 88%, 97% 증가하였다. 모든 데이터는 코어 터빈 속도가 150 krpm 일 때의 데이터이고, 감속기 적용 시험의 부하저항은 1 Ω 이다.

4. 결론

본 연구에서는 전기자동차 레인지 익스텐더에 적합한 초소형 가스터빈 파워팩 프로토타입 실험 장치의 개발 및 발전성능을 측정하였으며, 발전 성능 및 효율 최적화를 통해 초소형 가스터빈 파워팩의 레인지 익스텐더 적용 가능성을 시험하였다.

운전 특성 실험 결과, 코어터빈 회전속도가 150 krpm 일 때 (감속기 미적용), 최대 전기적 출력과 기계적 출력은 각각 0.82 kW, 1.40 kW 이며, 발전 효율은 58.6%이다. 또한 부하 조건에 따라 파워터빈 및 알터네이터 속도가 급격히 변하는 것을 확인하였다. 하지만, 부하 저항의 변화는 가스터빈-알터네이터 발전 성능에 영향을 주지 않았다. 따라서, 구동 모터 등에 의한 배터리 전력 사용과 관계없이 파워팩의 안정적인 전력 생산이 가능함을 보여주었다.

동력 전달 기어비에 따른 발전 성능 실험 결과, 가스터빈 동력축의 3:1 감속을 통해 최대 전기적 출력과 기계적 출력, 시스템 효율은 각각 1.5 kW, 3.3 kW, 1.81% 로서 88%, 136%, 97% 상승하였다. 특히 본 가스터빈은 레저용으로 단일 터빈 스테이지이며 재생기가 없기 때문에 상당히 낮은 열효율을 가지므로, 파워터빈 최적화를 할 경우 높은 출력 및 효율 상승을 기대할 수 있다. 또한, 동력 전달 기어비 변경을 통해 가스터빈 파워팩 발전 성능 및 효율의 최적화 가능성 및 필요성을 확인하

였다.

결론적으로, 본 연구의 초소형 가스터빈 파워팩은 기존 전기자동차 레인지 익스텐더의 가솔린 엔진과 비교하여, 초소형 가스터빈 적용을 통한 경량화 및 소형화의 가능성을 제시하였다. 또한, 자동차용 알터네이터 적용을 통하여 경제적이고 안정적인 1 kW 직류 전력의 생산이 가능함을 실험적으로 보여줌으로써 전기자동차 레인지 익스텐더 적용에 대한 가능성을 제시하였다. 향후 초소형 가스터빈 파워팩 실험장치는 부하 모터 연결을 통하여 실제 전기차 운전 상황을 모사 실험하고, 나아가 전기자동차에 탑재 및 주행 실험을 통하여 실증 연구를 진행할 계획이다.

후 기

이 논문은 2014 년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 연구 되었음 (NRF-2014R1A1A1007257).

참고문헌

(References)

- (1) Wu, J., Emadi, A., Duoba, MJ. and Bohn, TP., 2007, "Plug-in Hybrid Electric Vehicles: Testing, Simulations, and Analysis," Vehicle Power Propulsion Conference, pp. 469-476.
- (2) General Motors, <http://www.chevrolet.com/volt-electric-car.html>, accessed on Nov. 10, 2014.
- (3) BMW Corporation, http://www.bmw.com/com/en/newvehicles/i/i3/2013/showroom/technical_data.html, accessed on Nov. 10, 2014.
- (4) Boyce, MP., 2006, "Gas Turbine Engineering Handbook I," 3rd, Gulf Professional Publishing, Boston, pp. 24-25.
- (5) HIL Tech Developments Limited, 2000, The Use of Micro Gas Turbines in Hybrid Electric Vehicles: <http://www.bioturbine.org/Publications/PDF/microturbine-01-HILTECH.pdf>, accessed on Nov. 10, 2014.
- (6) Capstone Turbine Corporation, <http://www.microturbine.com/news/story.asp?id=460>, accessed on Nov. 10, 2014.
- (7) Capstone Turbine Corporation, <http://www.green-energy-news.com/nwslinks/clips308/mar08009.html>, accessed on Nov. 5, 2014.
- (8) Kim, J., Kim, S., Sun, J., Kim, S. and Kang, D., 2013, "Generator Output of Range Extended EV," KSAE conference, pp. 1871-1878.
- (9) Sim, K., Koo, B., Kim, C. H. and Kim, T. H., 2013, "Development and Performance Measurement of Micro-power Pack Using Micro-gas Turbine Driven Automotive Alternators," Applied Energy, Vol. 102, pp. 309-319.
- (10) JETCAT, Instruction manual for SPT5, <http://www.jetcat.de/downloads/spt5englisch230206.pdf>, accessed on Nov. 12, 2014.
- (11) Remy international INC, 2008, Improving Alternator Efficiency Measurably Reduces Fuel Costs: <http://delcoremy.com/Documents/High-Efficiency-White-Paper.aspx>.
- (12) Xu, M. and Marangoni, RD., 1994, "Vibration Analysis of a Motor-flexible Coupling-rotor System Subject to Misalignment and Unbalance, Part I: Theoretical Model and Analysis," J Sound Vib, Vol. 176, pp. 663-679.
- (13) Imai, K., Ashida, T., Zhang, Y., and Minami, S., 2008, "Theoretical Performance of EV Range Extender Compared with Plugin Hybrid," *Journal of Asian Electric Vehicles*, Vol. 6, pp. 1181-1184.
- (14) Pilavachi, P.A., 2002, "Mini- and Micro-gas Turbines for Combined Heat and Power," Applied Thermal Engineering, Vol. 22, pp. 2003-2014.
- (15) Park, C. H., Choi, S. K. and Ham, S. Y., 2011, "Prediction of Power and Efficiency Requirement of Motor/generator for 500W Class Micro Gas Turbine Generator Considering Losses," *Journal of Fluid Machinery*, Vol. 14, No. 5, pp. 25-30.
- (16) Shah, R. M. B. R. A., McGordon, A., Amor-Segan, M. and Jennings, P. A., 2013, "Micro Gas Turbine Range Extender : Validation Techniques for Automotive Applications," 4th Hybrid Electric Vehicle Conference.