Transactions of KSAE, Vol. 31, No. 4, pp.265-273 (April, 2023)

Check for updates

Copyright ⓒ 2022 KSAE / 209-04
pISSN 1225-6382 / eISSN 2234-0149
DOI http://dx.doi.org/10.7467/KSAE.2023.31.4.265

전기이륜차용 교환형 배터리의 직·병렬 연결에 따른 출력 특성 연구

이 승 원·조 병 욱·이 홍 종·한 창 수*

한국자동차연구원 전기동력기술부문

The Study on the Power Characteristics According to Series or Parallel Connection of Swappable Batteries for Electric Motorcycles

Seungwon Lee · Byoungwook Jo · Hongjong Lee · Changsu Hahn*

Electric Powertrain R&D Department, Korea Automotive Technology Institute, 303 Pungse-ro, Pungse-myeon, Dongnam-gu, Cheonan-si, Chungnam 31214, Korea
(Received 7 December 2022 / Revised 21 December 2022 / Accepted 23 December 2022)

Abstract：Electric motorcycles are being developed worldwide to reduce air pollution. In general, electric motorcycles have a short mileage per charge and take a long time to charge, so research on electric motorcycles with swappable battery is being actively pursued. Electric motorcycles with swappable battery may have different SOH and SOC for each battery. Therefore, electrical power characteristics may vary according to the series or parallel connection between multiple batteries. In this paper, five batteries for electric motorcycles were selected as samples. Power tests according to the series or parallel connection were performed using two of the five batteries. In case of a different SOC, N two batteries were combined and tested. In the case of a different SOH, one N battery and two batteries for life test were combined and tested. Finally, the experimental results were compared and analyzed.

Key words：Electric motorcycles(전기이륜차), Electrical power characteristics(전기적 출력 특성), State of charge(배터리 충전 상태), State of health(배터리 수명 상태), Swappable battery(교환형 배터리), Inrush current(돌입전류)

1. 서 론

세계적인 대기오염 저감을 위한 대책으로 전기이륜차가 제시되고 있으나 일반적으로 전기이륜차는 일체형 배터리를 가지고 있어 일충전주행거리가 짧고 충전 시간이 2 ~ 3시간이 소요되므로 장거리 사용을 위한 대안으로서 배터리 교환형 전기이륜차가 활발히 연구되고 있다.[1] 배터리 교환형 전기이륜차는 방전된 배터리를 충전 스테이션에서 완충된 배터리로 쉽게 교환할 수 있는 장점이 있는 반면, 교환시 배터리수명 상태(SOH, State of Health)가 현저히 다른 배터리가 장착되거나 사용자의 오용으로 배터리충전상태(SOC, State of Charge)가 다른 배터리를 연결하여 장착될 가능성도 있다. 또한 전기이륜차에서 다수의 배터리를 직렬로 연결하는지 병렬로 연결하는지에 따라 전기적 출력 특성과 사용가능 에너지량이 달라질 수도 있다.

이와 같은 교환형 배터리에 대한 특성 연구로서는 배터리 SOH 변화 시 전기적 출력 특성에 따른 신뢰성과 안전성을 시험한 연구,[2,3] 배터리 SOC 변화 시 측정되는 배터리의 용량 차이와 내부 저항의 변화를 시험한 연구,[4,5] 배터리의 직렬과 병렬연결에 따른 전압 불균형과 수명에 대한 연구[6] 등은 있었으나 배터리를 직렬 또는 병렬로 연결시 배터리의 SOC와 SOH 변화에 따른 전기적 특성과 안전성을 평가한 연구는 없었다. 따라서 본 연구에서는 배터리 2개를 직렬 또는 병렬로 연결할 때 배터리의 SOC 차이에 따른 출력 특성 및 다른 SOH의 배터리를 사용에 따른 출력 및 에너지량을 측정하여 직렬과 병렬 방식의 장단점을 파악하고자 하였다.

본 논문에서는 현재 시판되고 있는 V사 전기이륜차용

*Corresponding author, E-mail: cshahn@katech.re.kr
*This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium provided the original work is properly cited.

배터리를 시료로 선정하였다. 시험은 크게 2가지로 구분되며 하나는 SOC가 다른 2개의 배터리들을 결합할 때 직렬과 병렬에 따른 출력과 안전성을 파악하기 위한 시험이고 다른 하나는 SOH가 다른 배터리들을 결합할 때 직렬과 병렬에 따른 출력, 안전성 및 에너지량을 파악하기 위한 시험으로서 2개의 수명시험을 거쳐 열화된 배터리와 1개의 새 배터리를 조합하는 방식으로 시험하였다.

2. 시험조건

2.1 시험장치 구성

시험장치는 Fig. 1과 같이 전원 공급 장치, 제어기, 데이터수집장치, 센서(전압, 전류, 온도), 2개의 배터리로 구성하였다. 전원 공급 장치는 배터리를 충방전하는 기능을 수행하며, 제어기는 배터리에 연결된 센서에서 전압, 전류, 온도를 측정하여 고온, 과전류, 과전압, 저전압 등을 감지하여 차단하는 기능을 가지고 있다. 데이터수집장치는 시험에 따라 다른 주기로 측정되는 데이터를 저장하는 장치이다. 온도 센서는 Fig. 2와 같이 배터리 내부 BMS(Battery Management System)와 셀 사이, 외부와

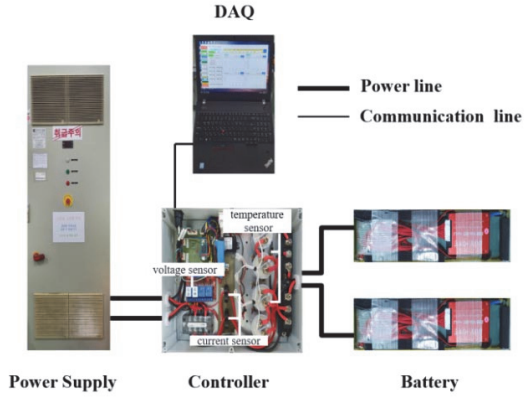


Fig. 1 Diagram of battery test equipment

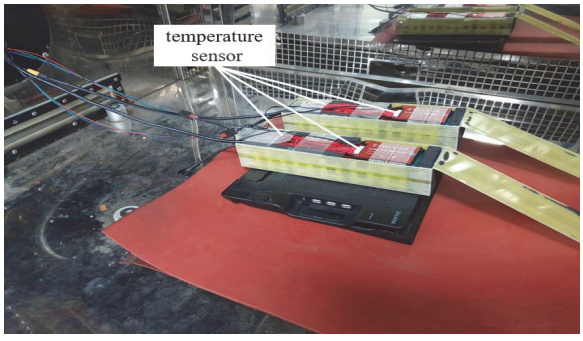


Fig. 2 Location of temperature sensor on each battery

Table 1 Battery specification

Voltage	Current		Capacity
	Charge	Discharge	
48 V	20 A	30 A	10 Ah / 480 Wh

셀을 분리하는 케이스의 셀과 가장 가까운 부분에 부착하였다. 배터리 사양은 Table 1과 같이 정격전압은 48 V이며 최대방전전류 30 A, 최대충전전류 20 A, 용량은 10 Ah, 480 Wh이다.

2.2 직렬/병렬 연결시 SOC 차이에 따른 출력 특성

배터리를 직렬 또는 병렬로 연결할 때 두 배터리의 SOC 차이로 인한 출력 특성을 평가하기 위하여 Fig. 3과 같이 회로를 구성하였다. 회로는 배터리 2개를 직렬과 병렬로 구성하기 위하여 전환스위치로 연결하였으며 배터리는 전압과 내부저항으로 표시하였다. 시험은 Table 2와 같이 배터리 2개 중 하나(B1)는 SOC 100 %로 고정시켰으며 다른 하나(B2)는 단계별 차이점을 파악하고 SOC의 차이가 있을 때 생기는 돌입전류의 위험성을 방지하기 위하여 SOC를 100 %, 90 %, 70 %, 50 %로 변화시켰고, 2개의 배터리를 직렬과 병렬로 연결하여 시험하였다. 수명에 대한 영향을 줄이고자 새 시료를 사용하였다.

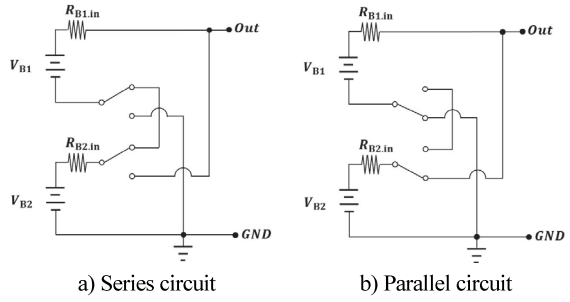


Fig. 3 Series and parallel circuits in power test

Table 2 Power test configuration with various SOC and connection type

No.	B1 SOC (%)	B2 SOC (%)	Connection type
1	100	100	Series
2	100	90	Series
3	100	70	Series
4	100	50	Series
5	100	100	Parallel
6	100	90	Parallel
7	100	70	Parallel
8	100	50	Parallel

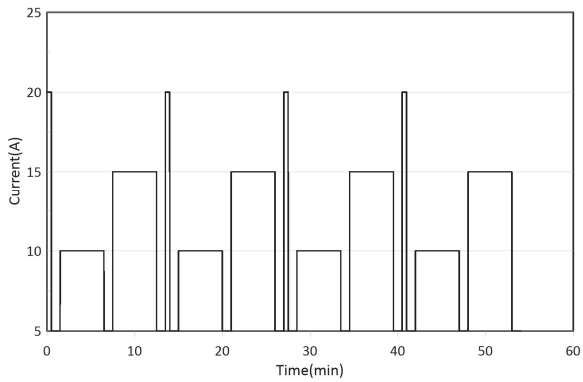


Fig. 4 Discharge current pattern for battery power test

출력 시험에는 Fig. 4와 같은 방전 전류 패턴을 사용하였다. 각 전류는 급격하게 변화하는 전기이륜차 실제 주행을 고려하여 30초간 2 C, 1분간 0.5 C, 5분간 1 C, 1분간 0.5 C, 5분간 1.5 C, 1분간 0.5 C를 1사이클로 하고 4번 반복하여 총 54분간 전류를 인가하였다.

2.3 SOH 차이에 따른 출력 특성

직렬/병렬 연결시 SOH 차이에 따른 출력 특성을 평가하기 위하여 Fig. 5와 같은 절차의 수명 시험을 실시하였다. 시험은 HPPC를 이용한 배터리 내부저항 측정, 6가지 출력시험, 100회의 배터리 충방전 사이클 시험으로 구성하였으며 배터리 충방전 사이클이 500회가 될 때까지 진행하였다.

2.3.1 HPPC 시험을 통한 내부저항 측정

배터리의 열화정도를 파악하고 가장 열화가 심한 시편을 선정하기 위하여 HPPC(Hybrid Pulse Power Characterization) 시험을 통해 배터리 내부 저항을 측정하였다.

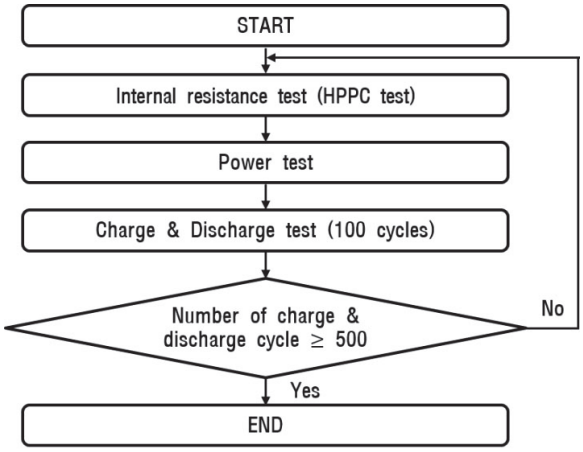


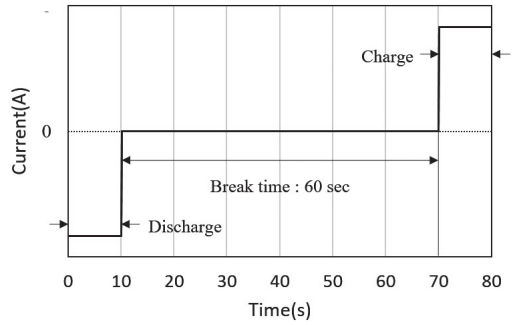
Fig. 5 Flowchart of power test according to the SOH

HPPC 시험은 배터리에 인가된 전류 펄스에 대한 전압 응답 등을 이용해 산출하는 시험이다. 이 시험은 짧은 시간동안 전류를 인가하여 전압과 전류의 변화를 측정할 수 있다. 이 때 전압이 충분한 정상상태에 도달하지 못하여 전압변화의 동적 특성이 정확히 측정되지 않는다는 단점이 있으나 단시간에 배터리의 내부저항을 계산할 수 있다는 장점을 가지고 있어 많은 연구에 사용되고 있다.[7)]

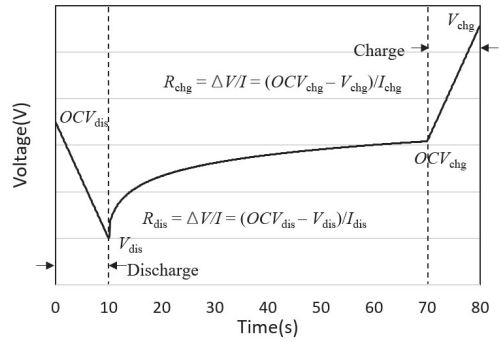
시험은 Fig. 6과 같이 SOC 50 %인 상태의 배터리에 0.5 C의 전류를 충전과 방전 순서로 10초씩 총 6회 인가하였으며 전압의 안정화를 위해 1회 인가 후 1분의 휴식시간을 주었다. 시험의 정확도를 높이기 위하여 2회 반복시험을 시행하였으며 데이터는 0.1초 간격으로 수집하였다.

배터리 내부 저항은 식 (1)을 이용하여 도출하였다.

$$R_{\mathrm{dis}} = \triangle V/I = (OCV_{\mathrm{dis}} - V_{\mathrm{dis}})/I_{\mathrm{dis}}$$
$$R_{\mathrm{chg}} = \triangle V/I = (V_{\mathrm{chg}} - OCV_{\mathrm{chg}})/I_{\mathrm{chg}} \quad (1)$$



a) Charge and discharge current pattern



b) Voltage during charge and discharge period

Fig. 6 Results of HPPC test

여기서 R_{dis}는 방전 시 배터리 내부 저항, OCV_{dis}는 방전 시작 직전 전압, V_{dis}는 방전 종료 시점 전압, I_{dis}는 방전 시 인가한 전류, R_{chg}는 충전 시 배터리 내부 저항, V_{chg}는 충전 종료 시점 전압, OCV_{chg}는 충전 시작 직전 전압, I_{chg}는 충전 시 인가한 전류를 나타낸다.

2.3.2 SOH 열화를 위한 사이클 시험

배터리의 SOH를 열화시키기 위하여 사이클 시험을 실시하였다. 배터리 충방전 사이클은 Fig. 7과 같이 0.7C로 CC(Constant Current)와 CV(Constant Voltage)를 사용하여 86분간 충전, 2분간 휴지, 1C로 60분간 방전, 2분간 휴지로 총 150분간의 시험을 1사이클로 지정하였고 Fig. 8과 같이 100사이클 단위로 매 50초마다 데이터를 수집하여 분석하였다.

2.3.3 직렬/병렬 연결시 SOH 차이에 따른 출력시험

직렬 또는 병렬 연결시 SOH 상태에 따른 전기적 출력 특성을 평가하기 위하여 Table 3과 같이 새 배터리(N)와 2.3.2절의 SOH 열화시험을 거친 배터리 2개(O1, O2)를 2개씩 조합하고 직렬과 병렬을 거쳐 총 6회의 시험을 진행하였다.

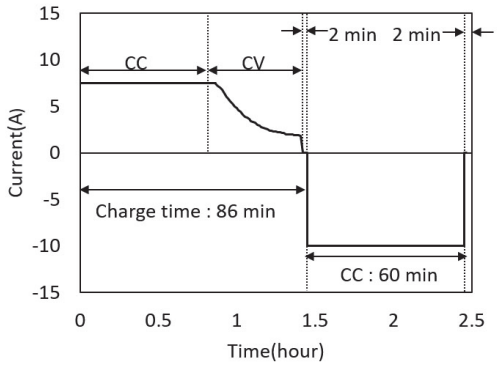


Fig. 7 1 cycle of charge and discharge

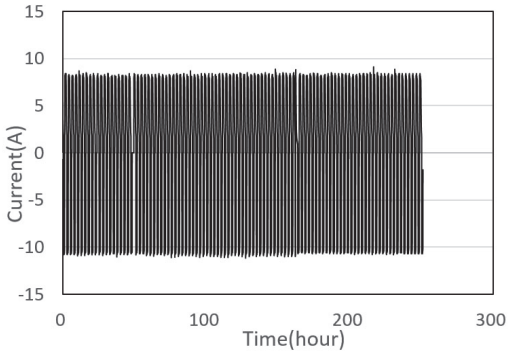
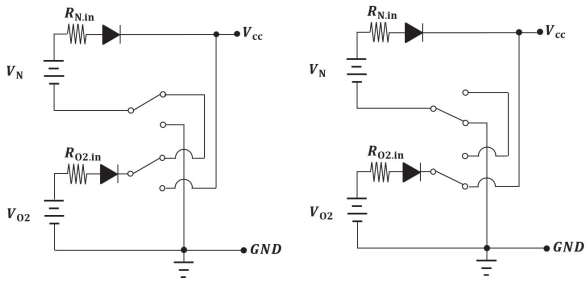


Fig. 8 100 cycle of charge and discharge

Table 3 Power test according to the SOH

No.	Batteries	Connection type
1	O1, O2	Series
2	O1, N	Series
3	O2, N	Series
4	O1, O2	Parallel
5	O1, N	Parallel
6	O2, N	Parallel



a) Series circuit b) Parallel circuit

Fig. 9 Series and parallel circuits in battery soh testing

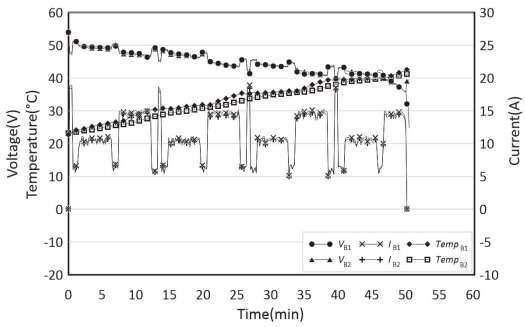
시험시 두 배터리를 동일한 SOC로 시험하기 위하여 충전전압은 53.3 ± 0.2 V로 설정하였다. 2.3절의 SOC 시험과 달리 이번 시험에서는 Fig. 9와 같이 각 배터리에 직렬로 다이오드를 추가하여 전압 차이로 인한 돌입 전류를 차단한 상태에서 시험을 진행하였으며 다이오드는 저항으로 작용하여 전체적인 효율은 낮아지게 하지만 안전성을 위하여 필요한 부품이다.

출력 시험에는 2.2절의 Fig. 4에 나타낸 전기이륜차 실제 주행을 고려한 전류 패턴을 동일하게 사용하였다.

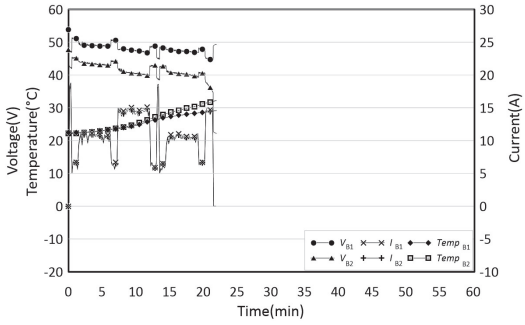
3. 시험 결과

3.1 직렬/병렬 연결시 SOC 차이에 따른 출력 시험 결과

2개의 배터리를 직렬 연결시 SOC 차이에 의한 출력 시험 결과는 Fig. 10과 같다. 두 배터리의 SOC가 동일한 경우 Fig. 10(a)와 같이 온도, 전압, 전류, 출력 특성은 동일하였다. 반면에 SOC가 차이가 날 경우 Fig. 10(b)와 같이 시험 시작부터 끝까지 전압 차이가 발생한 상태이지만 전류는 동일하게 사용되며 온도 또한 비슷하게 상승한다. 그러나 전체 사용 에너지에서는 직렬 연결의 경우 하나의 배터리가 종지 전압에 도달하면 전체 시스템이 차단되기 때문에 전체 사용 용량은 줄어들게 됨을 알 수 있다.



a) B1(SOC 100 %) and B2(SOC 100 %)



b) B1(SOC 100 %) and B2(SOC 50 %)

Fig. 10 Power test according to SOC difference in series connection

2개의 배터리를 병렬 연결시 SOC 차이에 의한 출력 시험 결과는 Figs. 11 ~ 13과 같으며 SOC의 상태가 다른 배터리를 병렬로 연결했을 때 나타나는 3가지 현상을 표현하였다. 이때 높은 전압의 배터리를 B1, 낮은 전압의 배터리를 B2라 칭한다.

먼저 외부의 부하는 없고 SOC 차이가 있는 상태에서는 Fig. 11과 식 (2)와 같이 전압의 차이가 존재하여 B1에서의 방전전류 I_{B1}가 B2로 흘러 충전전류(돌입전류) I_{B2}가 발생하였다.

이는 Fig. 15에서 (a)구간의 시험을 통해 알 수 있듯이 B1의 방전전류는 10 A이며 B2의 돌입전류는 10 A가 됨을 알 수 있다.

$$I_{B1} = -I_{B2} \tag{2}$$

돌입전류의 크기는 배터리 전압차에 비례하고 내부 저항에 반비례한다. 외부 부하가 없는 상태가 유지되면 Fig. 12와 같이 2개의 SOC가 같아질 때까지 전압이 높은 배터리가 전압이 낮은 배터리에 전압을 충전하였다.

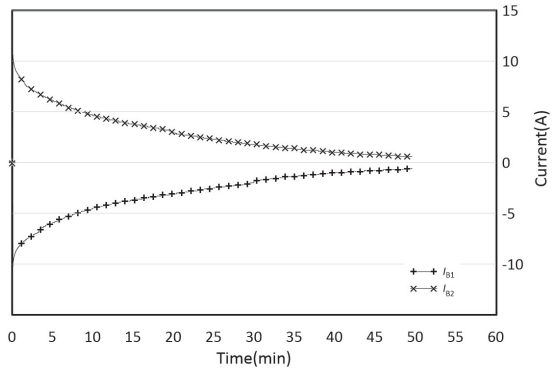


Fig. 12 Graph of electrical characteristics when a SOC 100 battery and a SOC 50 battery are connected in parallel

외부의 요구 부하가 작고 SOC 차이가 있는 경우에는 Fig. 13과 식 (3)과 같이 B1의 방전전류 I_{B1}이 전체 시스템의 출력 I_{out}과 B2의 충전전류(돌입전류) I_{B2}의 합이 된다.

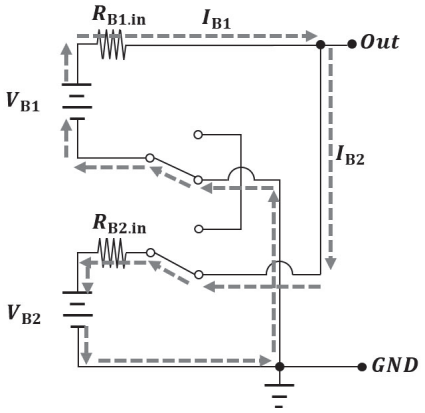


Fig. 11 Inrush current in parallel connection at no load

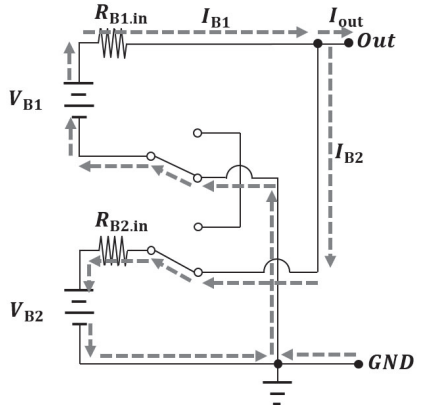


Fig. 13 Inrush current in parallel connection at small load

이는 Fig. 15의 (c) 구간으로서 B1의 방전전류는 13 A이고, B2의 충전전류는 2.5 A이므로 출력전류 I_{out}은 10 A 정도가 되는 것을 확인할 수 있다.

$$I_{B1} = I_{out} + I_{B2} \tag{3}$$

외부의 요구 부하가 클 경우 두 배터리 모두에서 방전이 진행되어 Fig. 14와 식 (4)와 같이 B1의 방전전류 I_{B1}과 B2의 방전전류 I_{B2}가 모두 전체 시스템의 출력 I_{out}이 되는 상태이다.

이는 요구전류 40A로 최대방전전류 30 A보다 높은 경우인 Fig. 15의 (b)구간이나 SOC 차이가 줄어들은 중후반이면서 요구전류가 20 A가 되는 Fig. 14의 (d)구간에서는 두 개의 배터리에서 전류가 출력되었다.

$$I_{out} = I_{B1} + I_{B2} \tag{4}$$

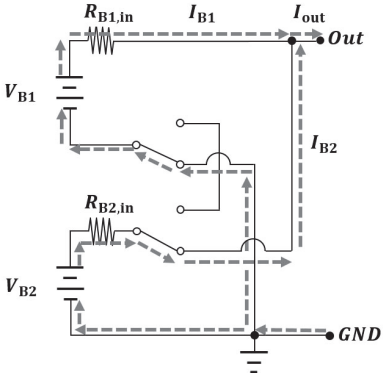


Fig. 14 No inrush current in parallel connection at big load

이러한 현상은 Fig. 15와 같이 외부에서 가해지는 부하와 배터리 SOC 상태의 영향을 받았다. 총 방전되는 전류가 두 배터리간의 전압차로 인한 전류보다 작을 경우

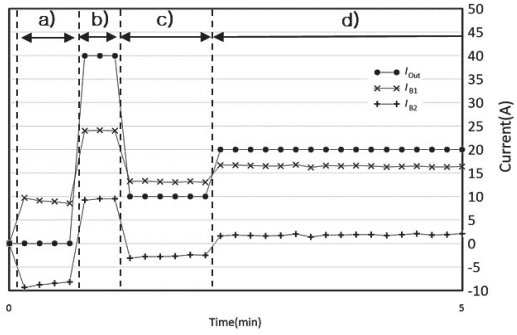
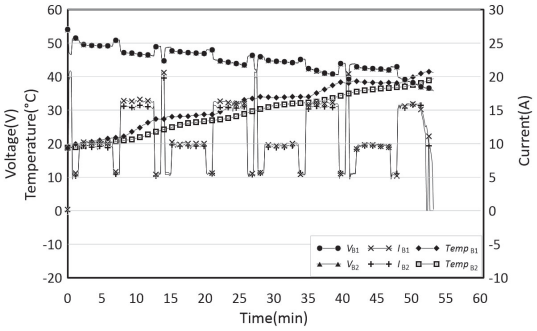


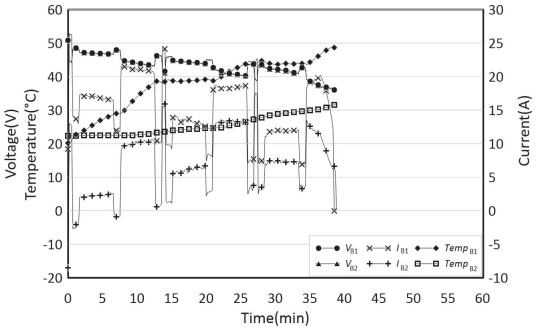
Fig. 15 Current change according to SOC and demand power

Fig. 13과 같은 현상이 발생하였고 반대의 경우 Fig. 14와 같은 현상이 발생하였다.

병렬 연결시 SOC가 동일한 경우 Fig. 16(a)처럼 직렬 시험과 비슷하게 두 배터리의 온도, 전압, 전류, 출력이 동일한 결과를 보였다. SOC의 차이가 있을 경우에는 Fig. 16(b)와 같이 두 배터리 사이에 돌입전류가 발생하면서 전류의 불균형이 발생하였다. 요구 전류가 BMS의 최대전류 이하일 경우 시험 초기에 SOC 100 %인 배터리에서의 방전전류가 SOC 50 %인 배터리로 충전되는 현상이 발생하였으며 그에 따라 SOC 100 %의 배터리에 대한 급격한 온도 상승이 발생하여 안전상 다소 문제가 될 수 있음을 알 수 있었다.



a) B1(SOC 100 %) and B2(SOC 100 %)



b) B1(SOC 100 %) and B2(SOC 50 %)

Fig. 16 Power test according to SOC difference in parallel connection

3.2 SOH에 따른 출력시험 결과

3.2.1 HPPC 내부저항 시험 결과

Fig. 17과 Table 4는 500회 수명시험을 실시한 배터리 O1과 O2에 대한 내부 저항 측정 결과를 나타내었다. 초기상태와 500회때의 내부저항을 비교하였으며 O1은 11.1 %가, O2는 28.0 %가 증가하였다. 이는 동일한 모델의 배터리라고 하더라도 상태에 따라 내부저항은 전체

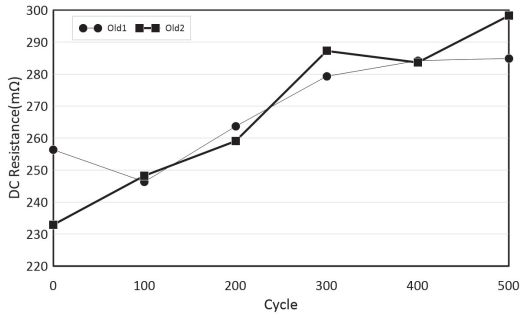


Fig. 17 Internal resistance of batteries per 100 cycles

Table 4 Internal resistance of batteries per 100 cycles

Cycle	Resistance (mΩ)	
	O1	O2
0	256.33	232.93
100	246.34	248.25
200	263.66	259.05
300	279.31	287.24
400	284.21	283.62
500	284.89	298.25

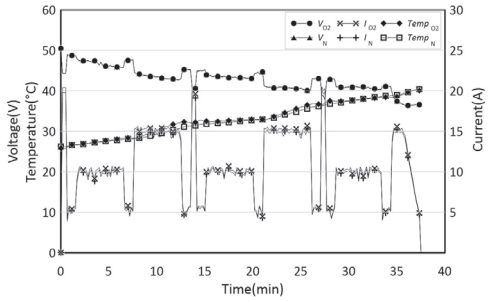
적으로 증가하고 있지만 증가량은 차이가 보일 수 있음을 알 수 있다.

3.2.2 직렬/병렬 연결시 SOH 차이에 따른 출력시험 결과

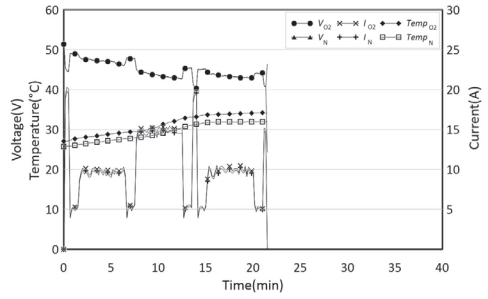
직렬 또는 병렬 연결시 SOH 차이에 따른 출력 특성을 파악하고자 새 배터리(N)와 500사이클 열화시킨 배터리 2개(O1, O2)를 사용하였다.

직렬시험 결과, Fig. 18과 같이 SOH가 열화된 배터리가 먼저 종지전압에 도달하면서 앞선 SOC 차이에 따른 시험과 유사한 결과가 나타났으며 다이오드가 회로에 추가되면서 약간의 용량 감소가 발생하였다.

병렬시험의 결과 Fig. 19(a)와 같이 SOH가 동일할 경우에 방전 패턴에 따라 각 배터리에 최대 20A까지 O2와 N에 적절하게 배분되어 방전이 이루어졌다. 반면 SOH가 차이가 발생할 경우에는 O2가 종지전압에 도달하기 전까지는 정상적으로 방전이 이루어졌으나 O2의 작동이 중단된 이후 양쪽 배터리에 요청한 20 A 배터리 전류의 합인 40 A가 갑자기 N으로 쏠리게 되면서 제한치가 30 A 근방인 27 A까지 치솟은 다음 전류가 줄어들게 되며 온도도 급격하게 상승하는 불안정한 상태를 보이게 되었다. 이를 통해 병렬 시험의 경우 배터리의 전류 상승으로 인한 온도제어 등 안전성에 대한 고려가 필요함을 알 수 있다.

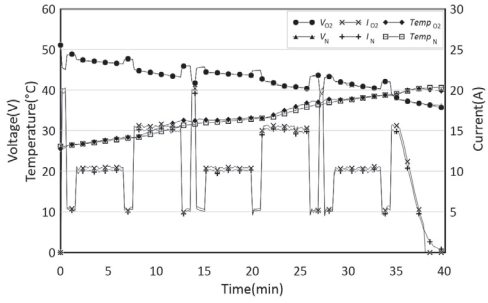


a) O2(0 cycle) and N(0 cycle)

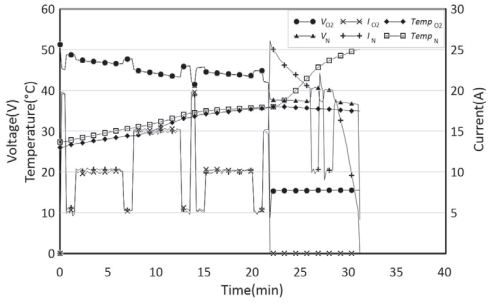


b) O2(500 cycle) and N(0 cycle)

Fig. 18 Power test according to SOH difference in series connection



a) O2(0 cycle) and N(0 cycle)



b) O2(500 cycle) and N(0 cycle)

Fig. 19 Power test according to SOH difference in parallel connection

Table 5는 배터리의 직렬 또는 병렬 연결시 SOH 차이에 따른 용량 시험 결과를 각 배터리에 대해 구분하여 나타내고 있다. O1과 O2의 경우 각각 초기, 300사이클, 500사이클 때의 용량 시험 결과를 나타내고 있지만 N의 경우에는 사이클 시험을 거치지 않았기 때문에 거의 초기와 유사한 결과를 나타낼 수 있는 상태이다.

Table 5 Battery capacity comparison between SOH difference test

Connection	Battery	Battery capacity (Wh)		
		0 cycle	300 cycle	500 cycle
Series	O1	307.32	270.34	158.86
	O2	296.16	266.29	154.40
	O1	283.58	264.18	167.58
	N	292.25	260.30	166.70
	O2	283.28	281.31	166.18
	N	290.73	274.24	161.58
Parallel	O1	318.70	275.05	160.34
	O2	318.70	285.34	152.85
	O1	285.43	276.25	173.62
	N	295.82	299.51	274.56
	O2	291.23	289.44	165.83
	N	301.00	290.59	279.22

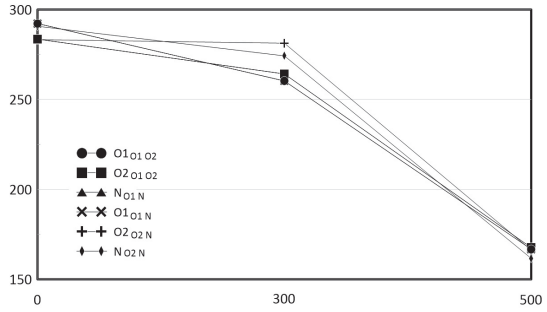


Fig. 20 Battery capacity change in series connection

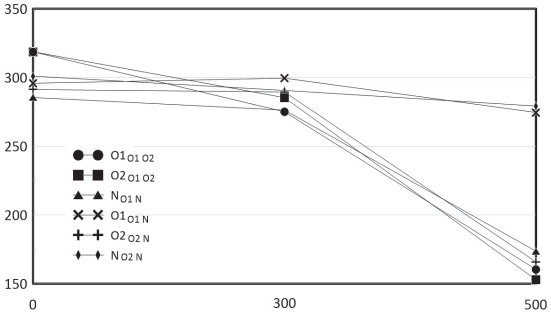


Fig. 21 Battery capacity change in parallel connection

그러나 Fig. 20에서 알 수 있듯이 직렬 연결시에는 배터리의 방전용량은 O1과 O2 뿐만 아니라 N의 경우에도 함께 시험이 중단됨으로써 300사이클 이후부터 급격히 줄어들었으며 500사이클에 도달했을 때 큰 용량 감소가 있음을 알 수 있다.

반면 병렬 연결시 SOH 차이에 따른 용량 시험 결과에서는 Fig. 21에서 알 수 있듯이 O1과 O2 배터리의 방전용량은 직렬 연결과 같이 300사이클과 500사이클에서 급격히 감소하였으나 N 배터리는 초기 상태와 동일한 상태를 유지할 수 있으므로 비록 출력은 다소 저하되더라도 주행거리 측면에서는 연장이 가능함을 알 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 두 개의 배터리를 직렬 또는 병렬 연결시 각 배터리의 SOC와 SOH의 차이가 존재할 때의 출력 및 에너지 특성에 대해 연구하였고 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

1) 직렬 연결의 경우 SOC 차이와 SOH 차이에 따른 출력 시험 결과는 유사하였다. 하나의 배터리에 전기에너지가 남아있더라도 열화된 배터리나 낮은 SOC의 배터리가 종지 전압에 도달하면 전체 회로가 끊어지게 되면서 총 사용에너지는 줄어들게 되므로 전기이륜차의 일충전주행거리가 짧아지는 단점이 발생할 수 있으리라 사료된다. 그러나 전류 쏠림이나 SOC 차이로 인한 돌입전류 등 온도상승에 대한 우려가 없어 안전성 측면에서는 우세하다고 판단된다.
2) 병렬 연결의 경우 SOC 차이에 의해 직접 연결시 돌입전류가 발생하였으며 이는 SOH 차이에 의해서도 발생할 수 있음을 확인하였다. 특히 하나의 배터리가 종지전압에 도달한 이후에 남은 배터리에서 순간적으로 큰 부하가 작용함으로서 온도가 급격히 상승하는 현상을 볼 수 있었다. 병렬의 경우 전체 사용에너지 측면에서는 한쪽의 배터리를 계속 사용할 수 있어 다소 유리하다고 볼 수 있지만 안전성을 위하여 다이오드를 사용하거나 추가 장치가 필요하게 될 경우 그 장점이 줄어들게 될 수도 있으므로 안전성 확보를 위한 연구가 더욱 필요함을 알 수 있었다.

결론적으로 전기이륜차용 교환형 배터리를 직렬 또는 병렬로 연결하는 것은 온전히 전기이륜차 제작사의 선택이겠지만 안전과 에너지용량을 함께 확보할 수 있는 방법을 더욱 강구하는 것이 필요하리라 생각되며 본 논문이 기본적인 정보 제공을 위한 자료로 활용될 수 있기를 기대해 본다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국산업기술평가관리원(KEIT)의 지원을 받아 수행한 연구 과제의 결과이다(No.20012368).

References

1) S. Kim, G. Kim, D. Na, J. Park, D. Yu, K. Rho, J. Lee and S. Zu, "Robust Frame Design for Battery Exchange-Type Electric Motorcycle," Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol.19, No.12, pp.113-118, 2020.
2) P. Lee, S. Kwon, D. Kang, S. Han and J. Kim, "SOH Estimation and Feature Extraction using Principal Component Analysis based on Health Indicator for High Energy Battery Pack," The Transactions of the Korean Institute of Power Electronics, Vol.25, No.5, pp.376-384, 2020.
3) C. Kupper and W. G. Bessler, "End of Life Prediction of a Lithiumion Cell based on Mechanistic Aging Models of the Graphite Electrode," Journal of the Electrochemical Society, Vol.165, A3468-A3480, 2018.
4) H. Kim, S. Heo and G. Kang, "Modeling and Characteristic Analysis of HEV Li-ion Battery Using Recursive Least Square Estimation," Transactions of KSAE, Vol.17, No.1, pp.130-136, 2009.
5) C. Zhou, K. Qian, M. Allan and W. Zhou, "Modeling of the Cost of EV Battery Wear Due to V2G Application in Power Systems," IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol.26, No.4, pp.1041-1050, 2011.
6) J. Choi, K. Park, Y. Kim and S. Lee, "Analysis of Battery Lifetime Characteristics with Current Peak Value of Boost Converter," Journal of Advanced Marine Engineering and Technology, Vol.41, No.7, pp.665-669, 2017.
7) H. Hwang, J. Nam and J. Choi, D. Jang and M. Park, "Design of Voltage Equalizer of Li-ion Battery Pack," The Transactions of the Korean Institute of Power Electronics, Vol.9, No.2, pp.187-193, 2004.