

에너지 저장 시스템 (ESS)용 배터리의 운전조건에 따른 성능 저하 및 태양광 연계형 ESS 모니터링 연구

정윤이¹ · 정한주¹ · 정연기¹ · 이재영² · 이홍기^{2†}

¹(주)루비, ²우석대학교 수소연료전지 부품 및 응용기술 지역혁신센터

Performance Degradation of a Battery in an Energy Storage System (ESS) under Various Operating Conditions and Monitoring Study of ESS Connected with Photovoltaic

EUNEY JUNG¹, HANJOO JUNG¹, YOUNKI JEONG¹, JAEYOUNG LEE², HONGKI LEE^{2†}

¹Ruby Co., Ltd. 156-5 Ojeon-dong, Uiwang-city, Gyeonggi-do 437-821, Korea

²Hydrogen Fuel Cell Parts and Applied Technology RIC, Woosuk University, Wanju, Jeonbuk 565-902, Korea

Abstract >> Performance degradation of a battery in 20 kWh energy storage system (ESS) under various operating conditions was studied. And energy saving of the ESS was also monitored by connecting with 20 kW photovoltaic (PV). PV-connected ESS saved 5~7% of energy consumption in 2013 compared to that without such system in 2012. As charge-discharge cycle increased, capacity decreased and the performance degradation was glaringly obvious after 40 cycles. And as charge and discharge rate increased, the performance degradation was more serious. After 50 charge-discharge cycles, a lot of degraded product was deposited on the surface of anode and cathode electrodes, and the cathode side was more contaminated. Therefore, in order to maintain the cell performance, it was more important to protect the degradation of the cathode side.

Key words : Energy storage system(에너지 저장장치), Photovoltaic(태양광), Energy saving(에너지 절약), Monitoring (모니터링), Cell performance(셀 성능), Performance degradation(성능 저하)

1. 서 론

대한민국은 에너지 소비량이 세계 10위이고, 석유 소비량이 세계 6위인 에너지 다소비국이며, GDP의 8.2%(375억불)을 에너지 수입에 사용하고 있는 실정이다. 이와 같이 에너지 수입 의존도가 매우 높

기 때문에 국제정세 및 대내외 환경에 따라 급변하는 에너지 가격으로 인해 국가 경쟁력이 크게 영향을 받는 것은 물론, 교토 의정서에서 채택된 탄소 배출권 거래 제도의 수용 측면에서도 미국, 중국, 일본, 호주 등이 구체적인 실행계획을 미루고 있는 반면에 대한민국은 아시아 국가 최초로 2015년부터 이 제도를 시행하여 매년 GDP의 2%를 녹색시장에 투자하여 2020년까지 배출 전망치 대비 31%를 자발적으로 감축할 계획을 발표한 상황이다. 따라서 에너

[†]Corresponding author : hongkil@woosuk.ac.kr

[접수일 : 2014.6.2 수정일 : 2014.6.27 게재확정일 : 2014.6.30]

Copyright © 2014 KHNES

지의 수요 및 공급을 관리하기 위한 다양한 방안들이 고려되고 있으며, 지구 온난화의 피해를 최소화하기 위한 최적의 대안으로 스마트 그리드 기술이 각광받고 있고, 이를 구현하기 위해서는 에너지 저장시스템(Energy Storage System, ESS)이 반드시 필요한 기술이다¹⁻³⁾.

ESS는 과잉 생산된 전력을 저장했다가 전력이 필요한 시점에 필요한 곳으로 공급해주는 에너지 저장 장치이며, 야간에 유휴전력을 저장하고 과부하시 전력을 사용함으로써 전력의 부하 평준화(첨두부하 분산)를 통해 발전소 건설비, 송전선 설치비 등의 투자비를 절감할 수 있을 뿐만 아니라, 전력 예비율을 높여 여름겨울철의 전력 피크와 대규모 정전 사고 등에 효과적인 대응이 가능하도록 해준다. 또한 ESS는 출력이 불규칙한 태양광, 풍력, 연료전지 등의 신재생 에너지원을 고품질 전력으로 변환하여 저장하고 실시간 전력 거래가 이루어지도록 하는 스마트그리드 구현을 위해서도 반드시 필요한 기술이다^{4,5)}.

ESS에는 배터리 방식과 비배터리 방식으로 구분된다. 전자는 이차전지 내에 에너지를 화학적 에너지 형태로 저장했다가 필요한 장소에서 필요한 시간에 사용하는 방식을 말하며, 고용량, 고효율을 강점으로 리튬이차전지가 가장 주목을 받고 있다. 이에 반해 후자는 물리적 에너지 형태로 저장했다가 사용하는 식으로 양수 발전, 압축 공기저장이 대표적이며, 대규모 저장에 적합하나 자연적 제약조건이 많기 때문에 향후 주도적인 에너지 저장기술로 자리

잡기는 어려울 것이다. 따라서 ESS는 특별한 언급이 없으면 배터리 방식을 의미한다⁶⁻⁸⁾.

ESS는 배터리 자체 외에도 배터리가 안정적으로 충전되고 방전될 수 있도록 제어하는 배터리 관리 시스템(Battery Management System, BMS), 생산 전력을 변환하고 관리하기 위한 전력 변환 시스템(Power Conversion System, PCS)과 전력의 생산, 변환, 소비 등을 제어하고 모니터링 하는 에너지 관리 시스템(Energy Management System, EMS)로 구성되어 있다⁹⁻¹¹⁾. 또한 ESS가 연결되는 계통 전력의 조건뿐만 아니라 연계되는 태양광, 풍력, 연료전지 등의 신재생 에너지와의 상호 조합 조건에 따라 다양한 영역의 시스템들이 추가되어 더 복잡하게 된다.

본 논문에서는 (주)루비에서 개발한 20kWh급 ESS에 20kW급 태양광을 연계하여 에너지 절감 효과를 모니터링하였고, 에너지 저장장치의 핵심부품인 리튬 배터리의 충방전 운전 거동에 대한 성능 저하 특성을 연구하였다.

2. 실험방법

2.1 태양광 연계 ESS의 에너지 관리 모니터링

Fig. 1은 (주)루비에서 제작한 20kWh급 ESS에 태양광 발전을 연계한 개념도이다. ESS는 계통 전력 과 20kW급의 태양광 발전 시스템에 연결되어 사용

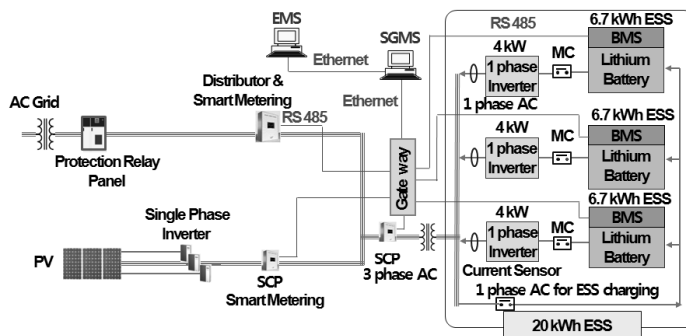


Fig. 1 ESS connected with PV manufactured by Ruby company



Fig. 2 ESS and PV installed at Hydrogen Fuel Cell Center in Woosuk university

되었다. (주)루비의 ESS 특징은 Fig. 3에서와 같이 각각의 셀에 개별적으로 BMS를 부착하여 트레이 개념으로 관리함으로써 개별적으로 셀의 충방전 상태를 관리하고, 이를 통해서 능동형 셀 밸런싱(active cell balancing)이 이루어짐으로써 배터리 팩 전체의 충방전 성능 범위를 크게 확대할 수 있는 장점이 있다. 또한, 한 셀이 문제가 있는 경우 그 셀 트레이를 새것으로 교체하기가 쉽고 자동으로 셀 밸런싱이 이루어진다는 장점이 있다.

이 시스템은 Fig. 2에서 보는 바와 같이 우석대학교 수소연료전지 부품 및 응용기술 지역혁신센터(RIC)

내에 설치하였고, 2013년 1월부터 안정적으로 작동하였다. 이 시스템에 의한 에너지 절감 효과를 확인하기 위해서 2013년 전력 사용 패턴을 모니터링하였고, 그 결과를 이 시스템을 설치하기 전인 2012년 전력 사용량과 비교하였다.

2.2 ESS의 충방전 특성 평가

ESS 성능 관리의 핵심 요소는 각 셀의 수명관리와 밀접하게 연결되어 있으며, 따라서 다양한 충방전 거동에 따른 ESS 각 셀의 성능 저하 현상에 대해 연구할 필요가 있다. 단시간에 다양한 변수에 대한 특성 변화를 연구하기 위해서 ESS에 대한 고속 충방전 시험을 실시하였다.

ESS 제작에 사용된 리튬 폴리머 셀은 코캄사의 40Ah 제품이고, 주요 사양은 정격 용량 40Ah, 정격 전압 3.7V, CUT OFF 충전 4.2V, 2A, 그리고 CUT OFF 방전 2.8V이다. 전류 변화에 따른 셀의 상태를 비교하기 위해서 셀을 A 그룹과 B 그룹으로 분류하고, A 그룹은 안정적인 전류(0.05C)로만 충방전하고, B 그룹은 상대적으로 높은 전류(0.5C~3C)로 충방전하면서 전기 용량을 검토하였다. A 그룹의 충전은 EA EL-9080 200 (사양 : 80V, 200A, 6kW) 파워

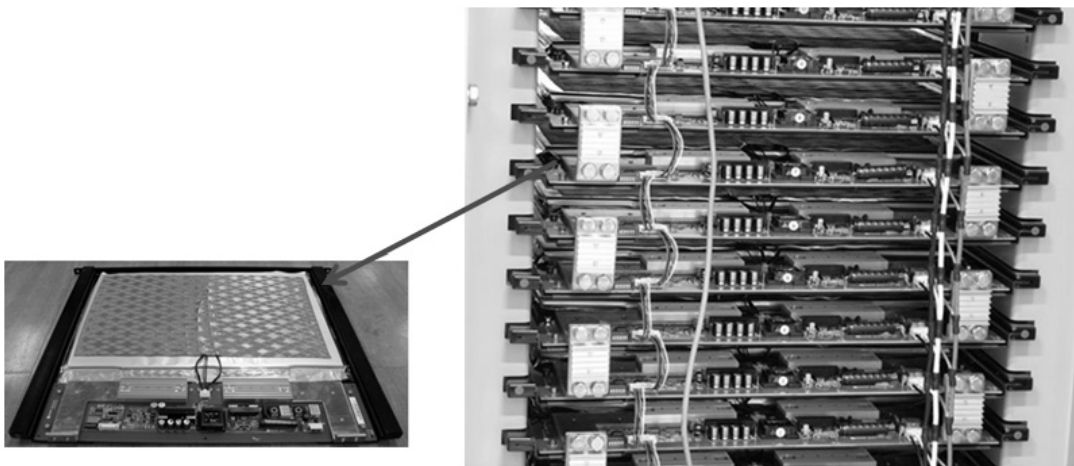


Fig. 3 Cell tray (cell + BMS) and the arrangement of cell trays in a ESS

서플라이를 사용한 후 방전은 EA EL-9080 600 (사양 : 80V, 600A, 7.2kW) 로터를 사용하여 측정하였다. 반면에 B 그룹은 SGI-80/375 6U (사양 : 80V, 175A, 30kW) 파워 서플라이에 의해 충전한 후 EL-5000P (사양 : 100V, 300A, 5kW) 로터에 의해 방전하였다.

ESS의 충방전 특성을 평가하기 위해서 40Ah 제품 20개를 연결하여 실험용 ESS를 제작하였다. 그리고 16 채널을 동시에 측정할 수 있는 Potentiostat을 사용하여 전력 특성을 평가하였다. 충방전 전후의 셀의 내부 전극 구조 변화를 관찰하기 위해서 글러브 박스 내에서 수분을 제거한 조건에서 분해한 후 전극 표면에 석출된 불순물 석출 형상 및 성분을 SEM/EDX를 사용하여 관찰 및 분석 하였다.

3. 결과 및 고찰

우석대학교 지역혁신센터의 연간 전기 사용 패턴을 확인하기 위해서 2012년 전기 사용량 추이를 분석하였다(Fig. 4). 연구소 특성상 연구 장비들의 안정적인 운전조건을 유지하기 위해서 연구실별 항온장치가 배치되어 있으며, 실내온도가 25°C로 설정되어 있기 때문에 예상했던 대로 동절기 전력 사용

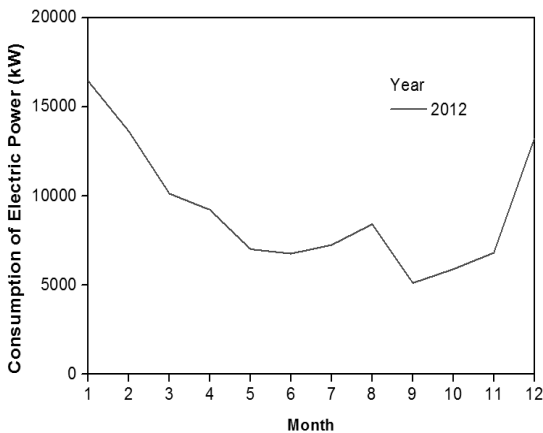


Fig. 4 Change of electric power consumption at Woosuk RIC in 2012

량이 월등히 높은 것을 볼 수 있다. 예상과 다른 점은 하절기에 냉방기 사용에 따른 전력 사용량이 높을 것으로 예상했으나, 이것의 영향은 그리 크지 않았다는 점이다.

우석대학교 지역혁신센터의 일별 전기 사용 패턴을 확인하기 위해서 2013년 12월 전력 사용패턴을 모니터링 한 후 동시간대 전력 평균값을 Fig. 5에 나타내었다. 근무시간 전력 사용량이 약간 증가하였으나, 예상과는 달리 그 증가량이 그리 크지 않았다. 이는 앞서서도 살펴보았듯이 연구실 실내온도가 25°C로 설정되어 있기 때문에 야간에도 전기 사용량이 높기 때문으로 판단된다.

(주)루비의 ESS는 프로그램에 의해 설정된 시간에 전력을 계통으로 방전하거나 계통으로부터 충전할 수 있는 기능을 가지고 있다. 따라서 2012년 12월 전력 사용 패턴을 모니터링한 결과를 반영하여 주간에 태양광에 의해 생성된 전기를 직접 이용하여 연구실 냉난방기를 운전하도록 설정하고, 잉여 전기를 ESS에 충전한 후 야간에 이 잉여전기를 사용하도록 설정하였다. 이와 같은 설정이 반영된 2013년 3월 전력 사용 패턴을 모니터링한 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 전체적으로 사용되는 전력 사용량이 주야간에 관계없이 거의 일정한 것을 볼 수 있다. 이는

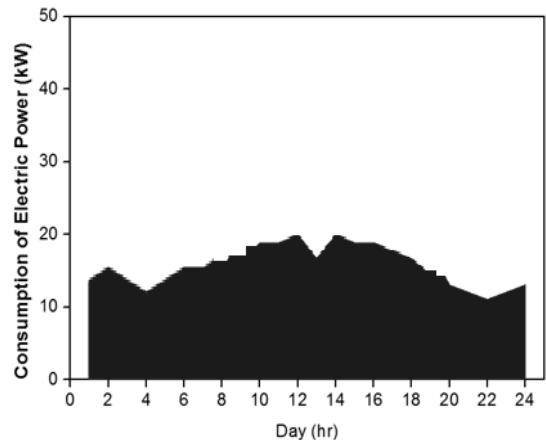


Fig. 5 Change of electric power consumption at Woosuk RIC in December, 2012

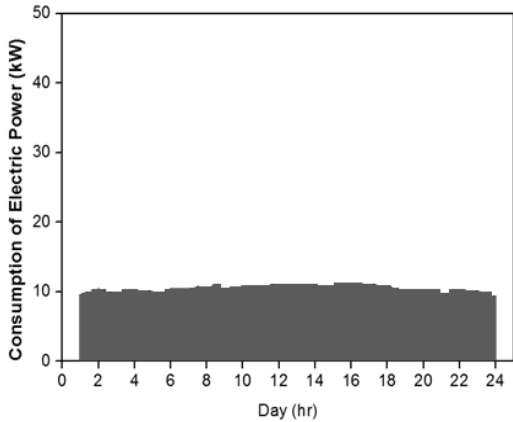


Fig. 6 Change of electric power consumption at Woosuk RIC in March, 2013

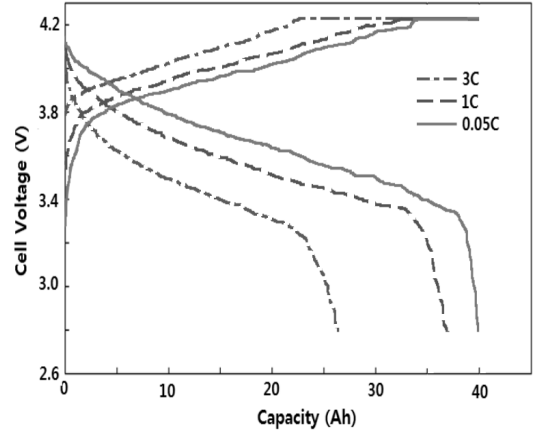


Fig. 8 Cell voltage - capacity curves for unit cell at various C-rates: charge 4.2V cut-off CCCV, discharge 2.8V cut-off

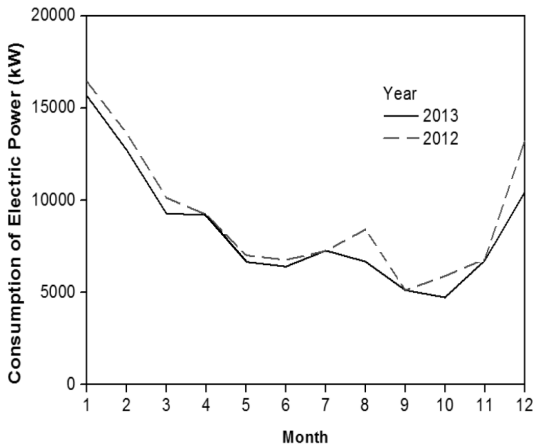


Fig. 7 Effect of ESS on the change of electric power consumption at Woosuk RIC

ESS가 효과적으로 작동한 결과로 판단되며, 전체적인 사용량이 약간 감소한 것은 12월과 3월의 계절적 요인으로 판단된다.

Fig. 7은 태양광 연계 ESS를 연구실들의 항온 조건을 유지할 수 있도록 계통에 연결한 후, 월별 전력 사용량 추이를 비교한 결과이다. 2013년과 2012년의 연간 기온 패턴에 따라 전력 사용량이 큰 영향을 받기 때문에 1년만의 모니터링 결과로써 결론을 도출하기에는 무리가 있지만, 전반적으로 5~7% 정도의 전력 사용량을 줄일 수 있었다. 추후 지속적인 모

니터링을 통해 다년간의 데이터를 축적할 계획이다.

C rate에 따른 셀 용량 변화 특성을 측정하여 Fig. 8에 나타내었다. 0.05C 방전에서는 거의 용량 감소 없이 전압곡선이 전형적인 LiCoO₂의 거동과 유사하였으며, C rate가 증가함에 따라 그 용량이 크게 감소하였고, 3C 조건에서는 60%까지 감소하였다. 5C 조건에서도 방전실험을 진행하였는데, 전압이 급격히 낮아지면서 용량이 10%도 발휘하지 못했고, 이와 같은 전압의 급격한 감소는 전형적으로 전극의 저항으로부터 발생하며, 전극 자체의 전기적인 저항이 증가함으로 인해 IR drop이 발생하고 이는 전압 강하로 이어짐을 확인하였다. 따라서 5C 조건에서의 실험은 본 과제에서는 배제하였다.

20개의 단위 셀(즉, 10개의 셀 모듈)로 구성된 ESS에서 셀의 위치에 따른 용량변화를 연구하기 위해서 0.05C rate로 50회 충방전 실험을 진행하면서 1, 3, 5, 7, 10번 셀 모듈의 오른쪽 셀에 대한 IR 특성을 측정하였고, 그 결과를 Fig. 9에 나타내었다. 충방전 초기 cycle에서는 모든 셀에서 전기 용량이 제조사에서 제공하는 용량 40Ah를 유지하였고, cycle 회수가 증가함에 따라 20회 이후에는 약간씩 감소하는 것으로 나타나는데, 5번째 셀에서 그 정도가 조금 더 심하게 나타났다. 특히 40회 이후에는 5번째 셀의 감소

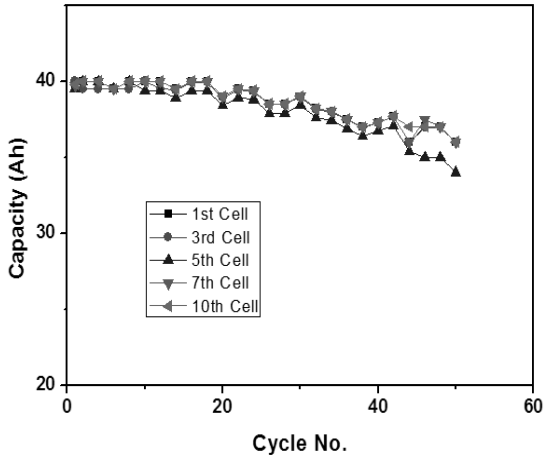


Fig. 9 Capacity curves for each unit cell in an ESS at 0.05 C-rate: charge 4.2V cut-off CCCV, discharge 2.8V cut-off

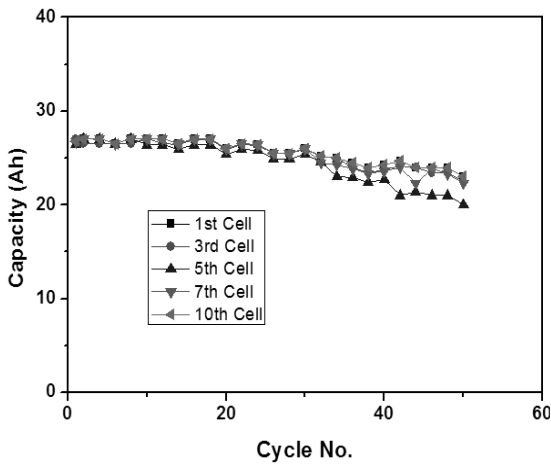


Fig. 10 Capacity curves for each unit cell in an ESS at 3 C-rate: charge 4.2V cut-off CCCV, discharge 2.8V cut-off

정도가 확실히 더 크게 나타나는 것을 볼 수 있다.

같은 형태로 제조된 ESS의 단위 셀들에 대한 충방전 시험을 3C rate로 50회 충방전 실험을 진행하면서 1, 3, 5, 7, 10번 셀 모듈의 오른쪽 셀에 대한 IR 특성을 측정하였고, 그 결과를 Fig. 10에 나타내었다. Fig. 9에서 0.05C rate로 실험한 것에 비해 그 값은 65% 정도 낮은 값을 나타내었지만 그 경향은 매우 유사함을 알 수 있다. Cycle 초기에는 26.5Ah 정도이며, cycle 회수가 20회 이후에는 약간씩 감소

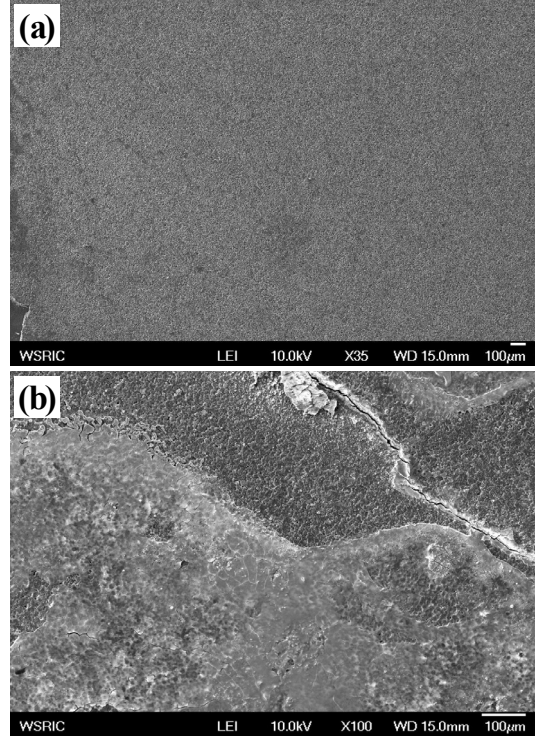


Fig. 11 Surface morphology of anode electrode: (a) new cell and (b) degraded cell after 50 charge - discharge cycles at 0.05 C-rate: charge 4.2V cut-off CCCV, discharge 2.8V cut-off

하기 시작하며, 그 감소 경향은 0.05C rate에 비해서 더 크게 감소하기 시작하였다. 또한, 5번째 셀에서 그 정도가 조금 더 심하게 나타나는 것은 0.05C rate로 실험했을 경우와 일치하였고, 그 감소 정도는 훨씬 더 크게 나타났다.

충방전 전후 셀의 내부 전극 구조 변화를 관찰하기 위해서 글러브 박스 내에서 수분을 제거한 조건에서 분해하였다. 50회 충방전한 셀은 분리막과 전극들이 많은 스트레스를 받아서 어그러져 있고, 특히 수십 겹의 양극-분리막-음극 층으로 이루어진 단위 셀에서 중앙 층 부근에서는 훨씬 더 큰 스트레스를 받은 것으로 보인다. 또한, 음극 층 표면에는 오염 물질이 많이 석출되어 있는 것을 육안으로 볼 수 있었다.

충방전에 의한 셀 전극의 부식 및 침적물 성분 등

을 확인하기 위해서 50회 충방전을 실시한 ESS의 5 번째 셀을 분해한 후 중앙 층의 어노드 및 캐소드 전극에 대한 SEM/EDX 분석을 하였다. 비교 대상으로 삼기 위해서 신제품에 대한 분석도 행하였다. Fig. 11은 어노드 층을 관찰한 결과로 신제품은 전극면이 고른데 반해 50회 충방전을 실시한 어노드 면은 표면이 불규칙하고 많은 부식이 진행된 것을 볼 수 있다. EDS 원소 분석 결과를 보면 Al 성분과 O 성분이 크게 증가되었는데, 이는 알루미늄 집전판이 녹아서 용출된 후 산화되기 때문으로 판단된다. 이 물질이 전극의 성능을 감소시켜서 전기 용량을 감소시키게 되는 것이다.

Fig. 12는 캐소드 층을 관찰한 결과로 신제품은 전극면이 고른데 반해 50회 충방전을 실시한 캐소드 면은 많은 부식물이 침착되어 있는 것을 볼 수 있다.

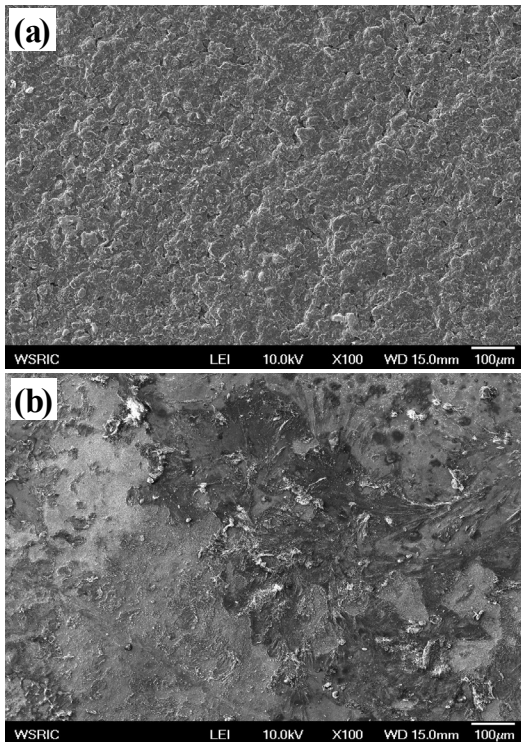


Fig. 12 Surface morphology of cathode electrode: (a) new cell and (b) degraded cell after 50 charge - discharge cycles at 0.05 C-rate: charge 4.2V cut-off CCCV, discharge 2.8V cut-off

EDS 원소 분석 결과를 보면 Cu 성분과 O 성분이 크게 증가되었는데, 이는 구리 전극이 녹아서 용출된 후 산화되기 때문으로 판단된다. 이 결과들은 어노드 층에 비해 훨씬 더 부식이 심하게 진행된 것을 알 수 있으며, 따라서 전극의 성능을 유지하기 위해서는 캐소드 층의 부식을 방지하는 것이 중요하다는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

(주)루비에서 개발한 20kWh급 ESS에 20kW급 태양광을 연계하여 에너지 절감 효과를 모니터링하였고, 에너지 저장장치의 핵심부품인 리튬 배터리의 충방전 운전 거동에 대한 성능 저하 특성을 연구하였다. ESS가 설치된 2013년의 전력 사용량이 ESS 설치 전인 2012년과 비교해서 5~7% 정도의 전력 사용량을 줄일 수 있었다. 충방전 회수에 따른 용량 변화는 cycle 회수가 20회 이후에는 약간씩 감소하였고, 40회 이후에는 감소 정도가 크게 나타났으며, 충방전 속도가 증가함에 따라 감소 정도는 더 크게 나타나는 것을 알 수 있었다. 50회 충방전 시험 후 어노드 및 캐소드 층을 관찰한 결과 많은 부식물이 침착되어 있고, 캐소드 층의 부식물 침착이 더 많았다. 따라서 전극의 성능을 유지하기 위해서는 캐소드 층의 부식을 방지하는 것이 중요하다는 것을 알 수 있다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부 산업융합원천기술개발사업(10043465)에 의해 수행된 연구결과임.

References

1. K. S. Choi, Y. K. Ahn, Y. C. Park, W. C. Park, H. M. Seo, K. M. Jung, and K. H. Seo, "Architectural design of home energy saving system based on

- realtime energy-awareness,” Proceedings of the 4th International Conference, 2009, pp. 1-5.
2. C. Y. Leong, A. R. Ramli, and T. Perumal, “A rule-based framework for heterogeneous subsystems management in smart home environment,” IEEE Transactions on Consumer Electronics (55), 2009, pp. 1208-1213.
 3. A. H. Mohsenian-Rad, V. Wong, J. Jatskevich, and R. Schober, “Optimal and autonomous incentive-based energy consumption scheduling algorithm for smart grid”, Innovative Smart Grid Technologies, ISGT, 2010.
 4. A. A. Akhil, G. Huff, A. B. Currier, B. C. Kaun, D. M. Rastler, S. B. Chen, A. L. Cotter, D. T. Bradshaw, W. D. Gauntlett, “(forthcoming) DOE/EPRI 2013 Electricity Storage Handbook in Collaboration with NRECA”, 2013.
 5. D. Bhatnagar, V. Loose, “Evaluating Utility Procured Electric Energy Storage Resources: A Perspective for State Electric Utility Regulators”, SAND2012-9422. Albuquerque, NM: Sandia National Laboratories.
 6. California Energy Commission (CEC), “Comparative Costs of California Central Station Electricity Generation”, CEC-200-2009-07SF. Sacramento, CA: CEC, 2010.
 7. D. Connolly, H. Lund, P. Finn, B. V. Mathiesen, and M. Leahy, “Practical Operation Strategies for Pumped Hydroelectric Energy Storage (PHES) Utilizing Electricity Price Arbitrage”, Energy Policy (39), 2011, pp. 4189-4196.
 8. P. Denholm, E. Ela, B. Kirby and M. Milligan, “The Role of Energy Storage with Renewable Electricity Generation. NREL/TP-6A2-47187”, Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory, 2010.
 9. A. Poullikkas, “A Comparative Overview of Large-scale Battery Systems for Electricity Storage”, Renewable and Sustainable Energy Reviews (27), 2013, pp. 778-788.
 10. C. J. Rydh, and B. A. Sandé, “Energy Analysis of Batteries in Photovoltaic Systems. Part II: Energy Return Factors and Overall Battery Efficiencies”, Energy Conversion & Management (46), 2005, pp. 1980-2000.
 11. J. P. Barton, and D. G. Infield, “Energy Storage and Its Use with Intermittent Renewable Energy”, IEEE Transactions on Energy Conversion (19), 2004, pp. 441-448.