

전력품질 안정화용 비대칭 하이브리드 슈퍼커패시터 셀 및 모듈 특성

The Characteristics of Asymmetric Hybrid Supercapacitor Cells and Modules for Power Quality Stabilization

이 병 관 · 맹 주 철 · 이 종 규 · 윤 중 략^{*}
(Byung-Gwan Lee · Ju-Cheul Maeng · Joung-Kyu Lee · Jung-Rag Yoon)

Abstract - In addition to the energy storage facilities based on high power technologies, Electric double layer capacitors(EDLC) are today's candidate for power quality stabilization. However, its low energy density is often inhibiting factor for application of electric power industry. Hybrid supercapacitor is an promising energy storage device that positioned between conventional EDLC and Li-ion battery. This paper describes the preparation and characteristics of a hybrid supercapacitor and module for power quality stabilization. A cylindrical 3200F hybrid supercapacitor (60 × 74.5 mm) was assembled by using the Li₄Ti₅O₁₂ electrode as an anode and activated carbon as a cathode. It shows 2.5 times higher energy density than conventional EDLC with the same volume. In order to determine the characteristics of the hybrid supercapacitor Module for uninterruptible power supply (UPS), hybrid supercapacitor cells were connected in series with active balancing circuit. At even the high current density of 14A(10C), Module prepared by 18 cells showed the capacitance of 170F at 30~50V, suggesting the applicability for UPS.

Key Words : Super capacitor, EDLC, Hybrid capacitor, Module, Power quality

1. 서 론

최근 화석에너지 고갈과 온실가스 배출에 의한 환경문제에 대한 해결방안으로 신재생에너지를 비롯한 다양한 분산전원이 보급되고 있다. 분산전원 중 풍력이나 태양광에서 발생하는 신재생에너지를 이용한 전력은 기상조건에 따라 출력의 변동이 심하여 연계되는 계통에 많은 전력품질문제를 발생시키고 있다. 현재 신재생에너지에서 전력품질 안정화를 위한 에너지저장장치로서 이차전지와 슈퍼커패시터가 사용되고 있다. 슈퍼커패시터는 다른 커패시터 대비 전력밀도가 높고 사이클 수명이 긴 특성을 지니고 있어, 주 에너지원의 느린 응답특성을 보상하는 데에 유용하게 사용될 수 있다[1, 2].

슈퍼커패시터는 대칭형과 비대칭형으로 구분할 수 있으며 대칭형은 전극으로 양극과 음극 모두 탄소소재를 적용하며 전기이중층 효과를 이용한다. 비대칭 하이브리드 슈퍼커패시터는 전극으로 양극 또는 음극에 탄소소재를 적용하고 다른 쪽에 리튬이차전지용 금속산화물 전극 소재를 사용한다. 이 경우 탄소 소재가 지닌 고출력 특성과 금속 산화물 전극소재가 지닌 고에너지 특성

을 동시에 이용할 수 있다[3-5]. 전력품질 안정화용 에너지저장장치로서 물리적 전기적 이중층을 형성으로 전기를 저장하여, 고출력 특성 및 충/방전 효율이 우수한 대칭형 슈퍼커패시터(EDLC : Electric Double Layer Capacitor)를 슈퍼커패시터 적용하려는 시도가 이루어지고 있으나, 높은 가격과 상대적으로 큰 부피가 상용화에 걸림돌이 되고 있다. 따라서 본 논문에서는 전극활물질로서 양극에 활성탄전극과 음극에 리튬계 전이금속산화물(LTO, Li₄Ti₅O₁₂)사용해 비대칭 전극을 적용함으로써, 양극에서는 이온의 물리적 흡·탈착 반응에 의한 전기이중층에 의해 전하를 저장하며, 음극에서는 Li이온 배터리와 같이 리튬 이온의 삽입/탈리 반응을 활용하는 하이브리드 슈퍼커패시터를 제조하였다[6]. 하이브리드 슈퍼커패시터를 전력 안정화를 위한 에너지 공급장치로 사용하기 위해서는 수십 혹은 수천 볼트의 고전압이 요구되므로 단위셀의 전압을 고려하여 직·병렬 연결하여 모듈 단위로 사용하게 된다. 하이브리드 슈퍼커패시터를 직렬로 연결하면 단위셀 사이의 용량 편차, 등가직렬저항 편차, 초기 전압 편차, 누설전류 편차, 사용시간에 따른 용량 감소율 편차 등에 의해 단위셀 사이의 전압 편차가 발생하게 된다. 이로 인하여 에너지 저장장치 모듈의 고장 원인으로 작용하고, 전기 에너지 저장 장치의 수명을 단축시키는 원인이 될 수 있다. 일반적으로, 단위셀 사이의 전압 편차 문제를 해결하기 위해 모듈 제조 시 밸런싱(balancing) 회로를 적용하고 있으며 셀 밸런싱 방식은 Passive 방식과 Active 방식을 적용하고 있다.

^{*} Corresponding Author : R&D center, Samwha Capacitor Co. Ltd, Korea

E-mail : yoonjungrag@samwha.com

Received : February 2, 2016; Accepted : March 18, 2016

2. 실험 방법

2.1 하이브리드 슈퍼커패시터 단위셀 제조

하이브리드 슈퍼커패시터 제조를 위한 양극은 활성탄(BET: ~1700 m²/g, ash contents <400 ppm), 도전제(Super-P) 및 바인더(PTFE)를 80:10:10(Vol%)의 비율로 수계에서 슬러리 제조 후 Al에칭박에 코팅 후 프레스하여 전극을 제조 하였다. 음극의 경우 LTO, 도전제(Super-P) 및 바인더(PVDF)를 80:10:10(Vol%)의 비율로 NMP(n-methyl-2-pyrrolidone) 용매에서 양극과 같은 방식으로 제조하였다. 그림 1은 하이브리드 슈퍼커패시터의 구조를 나타낸다. 제조된 양극 및 음극을 사용해 절연을 위한 셀룰로오스계 분리막과 함께 권취하여 젤리롤(Jelly-roll)을 제조하고 상부 및 하부에 Al 내부단자를 부착 후 레이저 용접을 통해 전극과 단자간 접촉성을 향상 시켰다. 내부단자가 조립된 젤리롤은 1M LiPF₆/Acetonitrile 전해액에 24시간 함침 후, 최종적으로 캔과 외부단자를 억지끼움 형태로 결합하여 캔 외부에 Curing으로 마감하는 방식으로 Φ60 × 74.5mm의 3000F급 Axial type 하이브리드 슈퍼커패시터 조립을 완료하였다. 특성평가는 Arbin cycler를 사용해 충방전 및 속도특성(C-rate)을 실시하였다.



그림 1 Axial type 하이브리드 슈퍼커패시터 구조
Fig. 1 The structure of hybrid supercapacitor with axial type

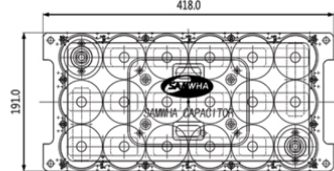
2.2 하이브리드 슈퍼커패시터 모듈 제조

정격전압 2.8V, 정격용량 3,000F을 가지는 axial type 하이브리드 슈퍼커패시터 셀을 이용하여 표 1의 규격을 가지는 165F, 50V급 하이브리드 슈퍼커패시터 모듈을 제작하였다. 18개의 셀을 직렬로 연결하였으며 셀간의 전압 불균형 문제를 해결하기 위해 Active 밸런싱 회로를 설계 및 적용하였다. 모듈의 사용전압 구간은 30V~50V로 설정하고 전력품질용 에너지 저장장치로서의 특성을 확인하기 위해, 충전기(Power supply)를 통하여 모듈을

충전하고 인버터 및 방전저항을 통하여 방전 특성을 확인하였다.

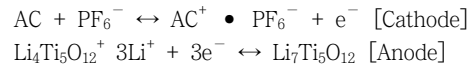
표 1 3000F 하이브리드 슈퍼커패시터 적용 에너지 저장장치 모듈 규격

Table 1 The specifications of energy storage module using hybrid supercapacitor axial type with 3000F

50V/165F	
도면	
개별 셀 사양	3000F / 2.8V
모듈 사양	165F / 50V (series 18EA)
개별 셀 크기	74.5mm / 60Φ
모듈 크기	191 * 418 * 130mm (W * D * H)
모듈 무게	5.8kg (Cell), 11kg(Total)
총 에너지 량(E)	0.5 * 165 * (50-30) ² = 132,000[J]
전압 사용 구간	50V ~ 30Vdc
밸런싱 방식	Active 밸런싱

3. 결과 및 고찰

하이브리드 슈퍼커패시터는 그림 2와 같이 10A의 전류밀도로 1.6~2.8V구간에서 충/방전을 실시하였다. 하이브리드 슈퍼커패시터는 음극활물질인 LTO의 Li⁺삽입 전위가 약 1.55V[7]이기 때문에 그 이하의 구간에서는 용량 구현을 하지 못하는 특성을 나타내기 때문에 하한 Cut-off 전압을 1.6V로 설정하였다. 충/방전 곡선은 시간에 따른 전압변화가 EDLC와 유사한 형태를 나타내며, 방전 초기에 전압이 급격하게 감소하는 IR-drop이 관찰되었으며, 이는 전극 활물질의 내부저항 때문이며, 특히 LTO에서의 Li⁺ Kinetics와 큰 연관성이 있는 것으로 알려져 있다[8, 9]. 방전용량 및 DC-ESR은 각각 약 1.08Ah 및 1.26mΩ으로 측정되었으며, 2.7V~1.6V 구간에서 Capacitance 산출 결과(Capacitance=전류 x 시간변화 / 전압변화) 약 3200F을 구현 하였다. 이는 동일 체적 EDLC 대비 약 2.5배를 구현하는 용량으로 아래 반응식에 따라 EDLC 특성과 리튬이온 이차전지 특성이 하이브리드 슈퍼커패시터 셀 내에서 동시에 구현되기 때문이다.



하이브리드 슈퍼커패시터의 출력 특성을 알아보기 위해 그림 3과 같이 10, 20, 50, 100, 150A의 전류에서 3 cycle씩 충방전을 실시하였다. 전류밀도가 증가함에 따라 방전용량이 감소하는 경향을 보였으나, 10A대비 150A에서 방전 시에도 약 78%의 용량 유지율을 보였으며, 이 결과는 순간 출력 보상으로 하이브리드

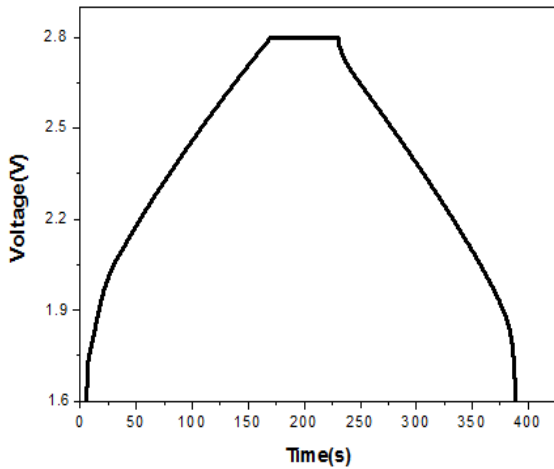


그림 2 10A, 1.6V~2.8V에서 측정된 하이브리드 슈퍼커패시터 충전방전 곡선

Fig. 2 The charge and discharge curve of hybrid supercapacitor at 10A, 1.6V~2.8V

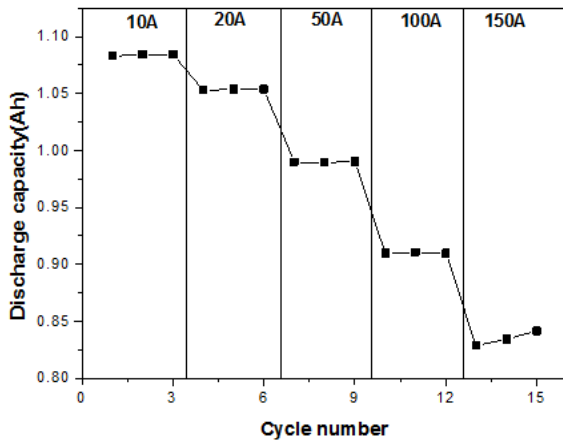


그림 3 1.6V~2.8V에서 측정된 하이브리드 슈퍼커패시터 속도 특성

Fig. 3 The C-rate characteristics of hybrid supercapacitor at 1.6V~2.8V

커패시터 적용이 가능하다는 것을 의미한다.

앞서 제조된 정격전압 2.8V, 정격용량 3,000F을 가지는 하이브리드 슈퍼커패시터 셀을 이용하여 표 1의 규격을 가지는 165, 50V급 하이브리드 슈퍼커패시터 모듈을 제작하였다. 18개의 셀을 직렬로 연결하였으며 각 셀에 능동형(active) 밸런싱 회로 적용하였다. 사용전압 구간은 30V~50V로 하였다. 전력품질용 에너지 저장장치로 특성을 확인하기 위하여 충전기를 통하여 모듈을 충전하고 인버터 및 방전저항을 통하여 방전 특성을 확인하였다.

그림 4는 하이브리드 커패시터 모듈 제작 시 적용한 셀 능동형 밸런싱 회로로서 방전 저항, FET, Reset IC 및 포토 커플러 등으로 구성 하여 설계 하였다. LED를 장착하여 2.63V에서 밸런

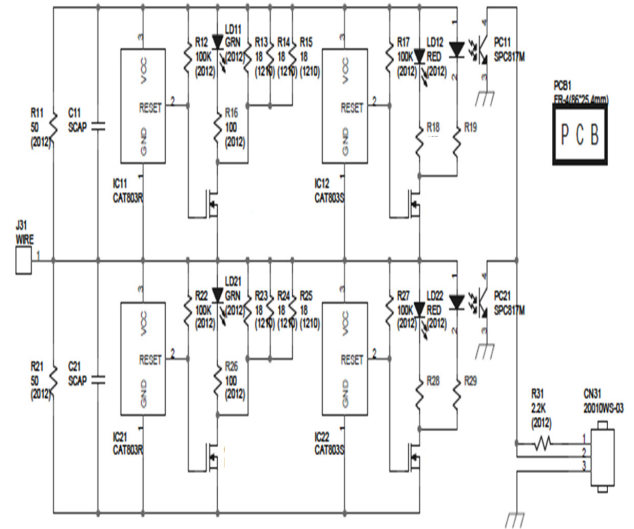


그림 4 단위셀 밸런싱 회로

Fig. 4 The balancing circuit of hybrid supercapacitor unit cell

싱 회로를 동작하고 셀 전압이 2.9V이상 계속 상승 시 2.93V에서 과전압 신호를 출력하고 저항에서 전류를 열로 태워 셀 전압을 더 이상 상승하지 않도록 설계하였다. 동작은 기준 전압 이상의 전압이 셀에 인가되면 Reset IC의 출력에 의하여 FET가 ON되어 밸런싱을 수행하며 과전압 발생 시에 두 번째 Reset IC의 출력에 의하여 FET가 ON되어 과전압 신호를 포토커플러를 통하여 송출하게 된다. 이와 같이 Reset IC를 적용하여 회로를 단순화 하여 밸런싱 회로에 셀의 밸런싱 및 과전압 신호를 송출할 수 있게 제작 하였다.

그림 5는 설계 및 제작된 셀 밸런싱 회로 동작특성으로서 밸런싱 회로가 구동되었을 때 셀에 인가된 전압이 2.63V 이상이

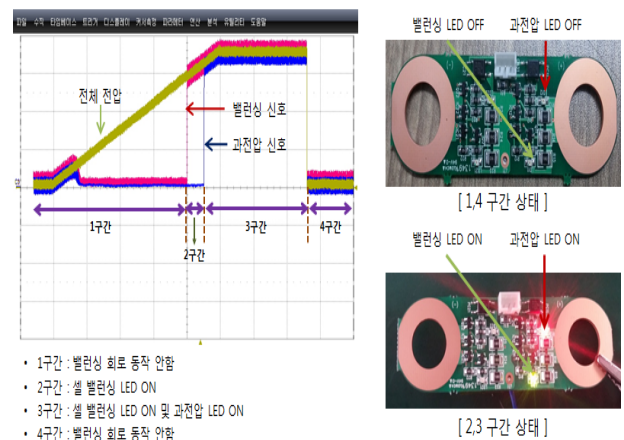


그림 5 단위셀 밸런싱 회로 동작특성

Fig. 5 The operating characteristics of balancing circuit of hybrid supercapacitor unit cell

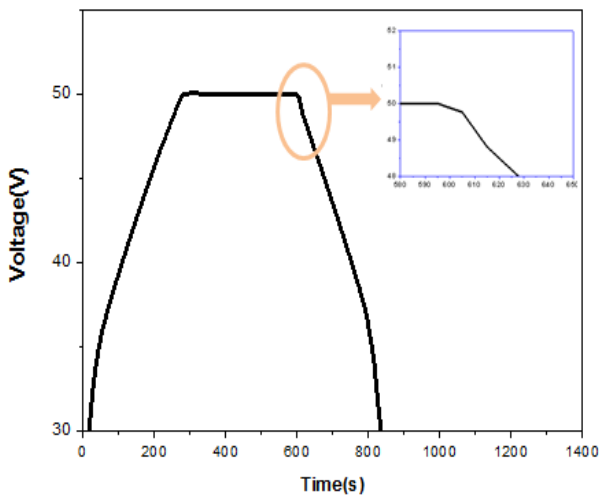


그림 6 50V, 165F 하이브리드 슈퍼커패시터 모듈 총방전 곡선
 Fig. 6 The charge and discharge curve of hybrid supercapacitor module with 50V, 165F

되면 Reset IC에서 High 신호가 송출되어 FET 스위치가 Turn On 되어 방전 저항을 통해 에너지가 소모되면서 밸런싱을 진행하며 LED로 표시된다. 그리고 셀의 인가된 전압이 2.93V 이상이 되면 두 번째 Reset IC가 High 신호를 송출하여 FET 스위치가 Turn On되어 과전압이 발생했다는 신호가 포토커플러를 통하여 송출하게 되고 이 상태를 LED를 통하여 표시한다. 밸런싱 회로 실험을 통하여 밸런싱 회로의 동작 및 과전압이 발생했을 때의 상태를 확인 할 수 있다.

그림 6은 표 1의 규격에 따라 50V, 165F 하이브리드 슈퍼커패시터 모듈을 제작한 후 전압구간 30~50V, 14A (10C) 조건에서 측정한 총방전 특성이다. 총방전 특성 결과를 통하여 모듈의 용량이 170F임을 확인하였고 DC-ESR은 7.41mΩ 으로 측정되었다. 단위셀의 총방전 곡선(그림 2)에서 나타난 것처럼 모듈의 총/방전 곡선에서도 방전 초기에 IR-drop 현상이 발생하였다. 단위 셀 대비 모듈의 저항이 크게 증가한 원인은 모듈 제조 시 저항 성분이 직렬연결에 따라 누적되었기 때문이다.

그림 7은 하이브리드 슈퍼커패시터 모듈의 전력품질용 에너지 저장장치로 가능성을 확인하기 위해 순간정전보상장치를 구성하여 측정한 시스템과 측정 결과이다. 측정결과 50V~30V 전압구간에서 3kw로 정출력 방전 시 60A~100A의 전류로 방전되었으며, 방전 시 보상시간은 35.2초였다. 이는 하이브리드 슈퍼커패시터 모듈이 순간정전보상장치에 적용이 가능함을 보여주는 결과이다. 정전 시 보상시간은 이론적으로 44초였으나 35.2초로 부족한 원인은 모듈 전압 강하, 인버터 변환 효율, 모듈 방전 효율, 접촉 저항 등의 영향으로 판단된다[10, 11].

4. 결 론

전기이중층 효과를 이용하는 EDLC는 전해 커패시터 및 세라

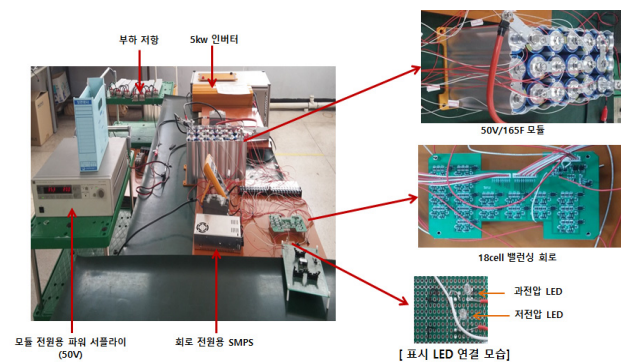
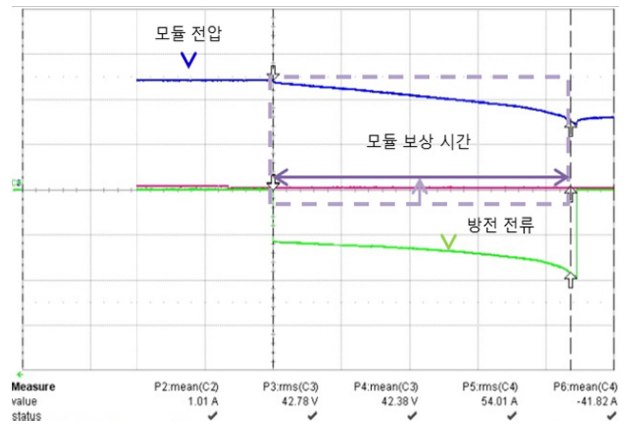


그림 7 순간정전보상장치를 이용한 하이브리커패시터 모듈 측정 결과

Fig. 7 The measurement results of hybrid supercapacitor module using voltage sag compensator

믹 커패시터 등의 커패시터와 달리 에너지 저장특성이 매우 우수하다는 특징을 나타내고 있으나, 에너지 저장장치로 적용하기에는 기존 납축전지 및 리튬이온 이차전지 대비 1/10수준의 매우 낮은 에너지 밀도를 가진다. 따라서 순간전압보상 장치에 적용하기 위해서는 부피 및 에너지 밀도 대비 가격이 높다는 제약사항을 가지고 있다. 본 논문에서는 기존 EDLC 대비 동일 체적에서 2.5배의 용량을 구현할 뿐 아니라 우수한 출력특성을 가지는 Axial type 하이브리드 슈퍼커패시터를 제조하고 총/방전 특성 및 속도특성을 평가한 결과, 3200F의 용량 및 1A 대비 150A에서 78%의 용량 유지율을 나타냈다. 최종적으로 앞서 제조된 3200F 하이브리드 커패시터 18개를 직렬연결하여 Active 밸런싱 회로를 적용해 50V, 165F급 모듈을 제작 후 3 kW급 순간정전보상장치를 구성하여 측정한 결과 50V~30V 전압구간에서 방전 시 60A~100A의 전류로 방전되었으며, 방전 시 보상시간은 약 35초로 측정되었다. 향후 모듈 전압 강하, 인버터 변환 효율, 모듈 방전 효율, 접촉 저항에 의한 방전 시간 감소 현상을 개선해 나간다면 전력품질 안정화와 관련된 응용분야에 적용 가능할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국에너지기술평가원에서 지원하는 에너지 기술개발사업(과제번호:20142020103060)으로 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사드립니다. (과제명 : 인터넷 데이터 센터(IDC) 전력품질 안정화를 위한 50kW급 하이브리드 슈퍼커패시터 모듈 개발)

References

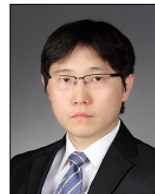
- [1] Byung Gwan Lee, Jung Rag Yoon, J. Electr. Eng. Technol., 7(2), 207 (2012).
- [2] W. J. Lee, H. J. Cha, J. Electr. Eng. Technol., 10(1), 146 (2015)
- [3] Min-Geun Choi, Soo-Bin Kang, Jung Rag Yoon, Byung Gwan Lee and Dae-Yong Jeong, J. Electr. Eng. Technol., 10(3), 1102 (2015)
- [4] Jung-Rag Yoon, Esther Baek, Hong-Ki Kim, Michael Pecht, Seung-Hwan Lee, Carbon, Volume 101, 9 (2016)
- [5] Abu Riduan, Md Foaisal and Gwiy-Sang Chung, Trans. Elect. Electron. Mater. 125, 13 (2012)
- [6] M. S. Hong, S. H. Lee, S. W. Kim, Electrochem. Solid St. 5, 227 (2002)
- [7] D. Peramunage, K.M. Abraham, J. Electrochem. Soc. 145, 2609 (1998)
- [8] Q. Wang, Z. Wen, J. Li, Adv. Funct. Mater. 16, 2141 (2006)
- [9] J. Y. Luo, Y. Y. Xia, J. Power Sources, 186, 224 (2009)
- [10] Jin Geun shon, Trans. KIEE vol. 58p, no. 2, 101 (2009)
- [11] Jin Geun shon, Hee Jong Jeon, Trans. KIEE, vol. 58, no. 4,763 (2009)

저 자 소 개



이 병 관 (Byung-Gwan Lee)

2009년 국민대학교 대학원 신소재공학과 공학석사. 2009년~현재 삼화콘덴서공업(주) 연구소 책임연구원



맹 주 철 (Ju-Cheul Maeng)

2009년 성균관대학교 대학원 전기전자컴퓨터공학부 공학석사. 2013년 현재 삼화콘덴서공업(주) 연구소 선임연구원



이 종 규 (Joung-Kyu Lee)

2011년 경기대학교 대학원 신소재공학과 공학석사. 2011년~현재 삼화콘덴서공업(주) 연구소 선임연구원



윤 중 락 (Jung-Rag Yoon)

1993년 명지대학교 대학원 전기공학과 공학석사. 1999년 명지대학교 대학원 전기공학과 공학박사. 1994년~1996년 한국쌍신전기(주) 선임연구원. 1996년~현재 삼화콘덴서공업(주) 연구소 연구소장