

LED 비상 유도등을 위한 하이브리드 슈퍼커패시터 모듈의 동작 특성

맹주철, 윤중락^a

삼화콘덴서공업(주) 연구소

The Operation Characteristics of Hybrid Supercapacitor Module for LED Emergency Luminaires

Ju-Cheul Mang and Jung-Rag Yoon^a

R&D Center, Samwha Capacitor Co., Ltd., Youngin 449-884, Korea

(Received June 20, 2015; Revised June 24, 2015; Accepted June 24, 2015)

Abstract: Hybrid supercapacitors with high power density and long cycle life are widely used for emergency power source of LED emergency luminaires. In this paper, we designed and fabricated a hybrid capacitor cell and a module for the LED emergency luminaires. Using hybrid supercapacitor cells (1,000 F, 2.8 V), we designed a module in a 10-year warranty considering aging and ESR. Considering the ESR and efficiency has been designed to module with 1,000 F 5.6 V design results in 2 series and 2 parallel combination. Module was used to confirm that the operation 77.5 minutes at room temperature, discharge LED emergency luminaires with 2 W. As a LED emergency luminaires of emergency power supply that we can support more than 10 years of life was confirmed the applicability of hybrid supercapacitor.

Keywords: Hybrid capacitor cell, LED emergency luminaires, Hybrid supercapacitor module, High power density

1. 서 론

산업, 기술의 발전에 의해 최근 건축물은 대형화, 복잡화 및 고층화되고 있다. 이에 화재사고 시 유독 가스의 영향으로 대형 인명피해가 발생하게 된다. 따라서 화재 발생 시 사람들을 안전한 곳까지 유도하기 위한 비상 유도등의 역할이 매우 중요하다. 모든 소방 대상물에 설치하도록 규정되어 있는 유도등은 정상상태에서는 상용 전원에 의하여 점등되고, 상용 전원이 정전

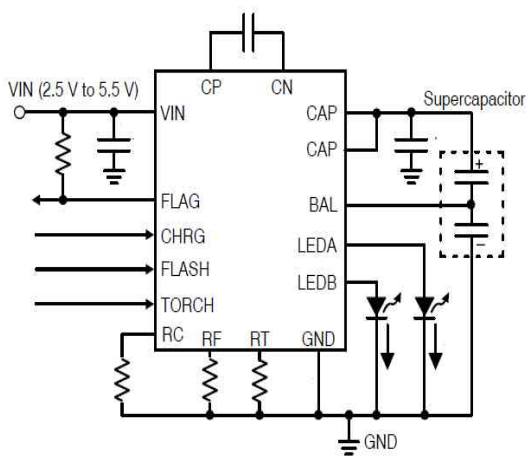
되는 경우에는 내장된 비상전원(축전지)으로 자동 전환되어 점등되는 등이라고 규정되어 있다 [1,2]. 현재 유도등 예비 전원 배터리는 주로 니켈 카드뮴 전지가 사용되고 있으며 최근에 비상용 LED 전원으로 연구되고 있는 슈퍼 커패시터의 특성과 비교하면 표 1과 같다.

니켈 카드뮴 전지는 이차전지 중에서도 자연 방전율과 내부저항이 적고, 과방전, 과충전 등 열악한 사용 환경에서도 견뎌 낼 수 있는 장점이 있다. 하지만 카드뮴은 환경 규제물질로 사용 제한을 받고 있으며 표준 충전 시 전지 용량치의 1/10 정도의 전류로 14~16시간 충전시간이 필요한 단점이 있다. 슈퍼 커패시터와 비교 시 에너지 밀도는 니켈 카드뮴 전지가 5배 이상을 가지는 반면 출력 밀도는 슈퍼 커패시터에 비해 1/600배의 특성을 나타냄을 볼 수 있다. 슈퍼 커패시

^a Corresponding author; yoonjungrag@yahoo.co.kr

Table 1. Comparison of supercapacitor and a Ni-Cd battery for emergency lighting.

	Ni-Cd Battery	Super Capacitor
Density of Energy	32 Wh/kg	6 Wh/kg
Density of power	0.1 kW/kg	6 kW/kg
Life time	4 years	1,000,000 cycles

**Fig. 1.** Typical LED application circuit with supercapacitor.

터는 수명시간 측면에서는 유리하지만 에너지 밀도가 낮아 에너지 저장매체로서 큰 체적이 요구되고 가격이 높은 단점을 가지고 있다 [3,4].

최근 유도등의 광원으로는 LED (light emitting diode)를 주로 사용하는 LED는 전구 등의 다른 열 변환 발광 소자에 비해 안정적이고 신뢰성이 있으며, 그 수명도 연속 통전 상태에서 10만 시간 이상으로 길다. LED는 다이오드의 일종이므로 소자 하나를 구동하는데 불과 수 V 전압 및 수 mA 전류로 구동된다. 현재의 유도등에 사용 중인 LED는 10년 이상의 수명을 가지는 반면, 예비전원으로 사용되는 니켈 카드뮴 전지의 경우 수명은 4~6년으로 제한적이다 [5]. 최근에는 비상 유도등 시스템에서 유지보수 비용의 대부분을 차지하는 배터리 교체에 대해 비용을 줄이기 위하여 에너지 저장 매체로서 장수명을 가지는 슈퍼 커패시터의 사용이 증가되고 있다.

그림 1은 슈퍼 커패시터를 이용한 LED 구동용 회로의 대표적인 예로서 에너지 저장매체로서 슈퍼 커패시

터 사용하며 셀(cell) 밸런싱 및 LED의 전류를 제어할 수 있는 회로 구성이다 [6].

본 논문에서는 비상용 유도등에 적용 가능한 에너지 저장매체로서 니켈 카드뮴 전지와 슈퍼커패시터의 장점을 고려하여 에너지 밀도를 향상한 리튬 티탄산산화물(Li₄Ti₅O₁₂)을 음극 물질로 이용한 하이브리드 슈퍼커패시터(hybrid supercapacitor)를 제작하여 적용하였다 [7,8].

제작된 하이브리드 슈퍼커패시터를 이용하여 LED 유도등의 비상전원으로 사용하기 위해 에너지 저장 매체로서의 전기적 특성을 평가하고 모듈을 설계하였다. 설계된 하이브리드 슈퍼커패시터 모듈을 LED 비상 유도등 전원으로 사용 가능성 여부를 확인하였다.

2. 실험 방법

2.1 비상 유도등

실험에 사용한 비상 유도등은 천정형 피난구용 중형 유도등으로 A사 제품을 이용하였다. 제품의 전기적 사양은 표 2로서 7.2 W 정격을 가지는 LED 광원을 이용한 제품이다.

Table 2. Specification of emergency luminaires.

Rated Voltage	AC 220 V	Power	7.2 W
Lighting Time	60 min	Standby Power	DC 3.6 V, 800 mAh
Light Source	LED	Size(mm)	256(W)×287(H)×106(D)

그림 2는 실험에 사용한 제품의 시스템 블록도와 구성도를 나타내었다. 동작을 보면 정상 상태에서는 상용 전원으로 DC-DC 컨버터를 이용하여 예비 전원을 충전하고 LED를 점등되도록 설계되어 있으며 비상 시에는 비상 전원에 충전된 에너지를 사용하여 LED를 점등 시키는 구조로 되어 있다.

제품은 LED부, 회로부, 비상 전원부 및 표시부로 구성된다. LED부의 경우 12개의 LED로 이루어져 있으며 예비 전원부의 경우 니켈 카드뮴 800 mAh 전지를 사용하였다.

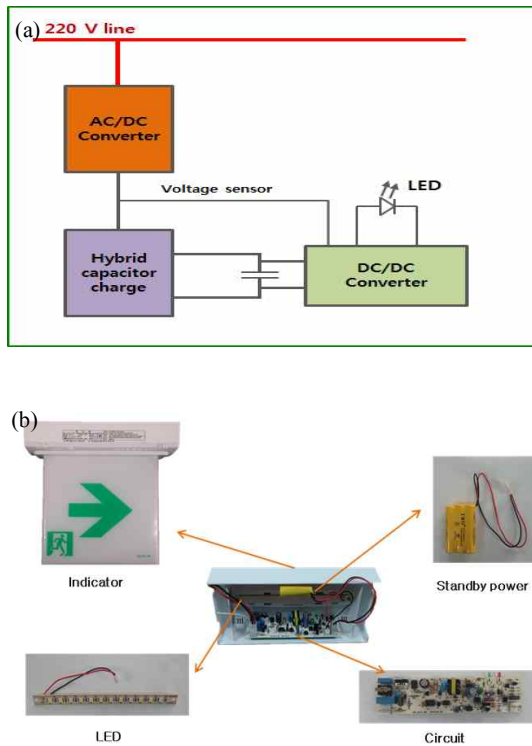


Fig. 2. System block diagram and configuration of emergency luminaires.

2.2 하이브리드 슈퍼커패시터

슈퍼커패시터는 그림 3과 같이 전극 및 메커니즘에 따라 활성탄을 전극으로 사용하고 전기이중층 전하흡착 메커니즘을 갖는 전기이중층 슈퍼커패시터 (electric double layer capacitor, EDLC), 금속 산화물과 전도성 고분자를 전극재료로 사용하고 유사용량 메커니즘을 갖는 유사 슈퍼커패시터(pseudo supercapacitor)가 있다.

최근에는 이차전지처럼 산화·환원반응을 통해 에너지를 저장하는 음극물질과 전기 이중층 커패시터와 같이 전기이중층에 전하를 모으는 양극물질을 사용한 하이브리드 슈퍼커패시터가 있다. 대표적으로 현재 개발되어 사용되는 제품은 LIC (lithium ion capacitor)와 그림 4와 같이 양극(cathode)은 활성탄을 사용하고 음극(anode)에 리튬 티탄산화물 ($\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$)을 적용한 비대칭 전극구조를 갖는 하이브리드 슈퍼커패시터가 있다.

본 논문에서는 그림 4의 구조를 가지는 하이브리드

Super Capacitor (EDLC)	Hybrid Supercapacitor (LTO Capacitor)	Li-ion Capacitor (LIC)
$\frac{1}{C_{EDLC}} = \frac{1}{C_a} + \frac{1}{C_c}$ $C_a = C_c = C_{AC}, C_{EDLC} = \frac{C}{2}$ $E = \frac{C_{EDLC} V_{EDLC}^2}{2} = \frac{C_{AC} V_{EDLC}^2}{4}$	$\frac{1}{C_{LIC}} = \frac{1}{C_a} + \frac{1}{C_c}$ $C_a \gg C_c = C_{AC}, C_{LIC} = C_{AC}$ $E = \frac{C_{LIC} V_{LIC}^2}{2} = \frac{C_{AC} V_{LIC}^2}{2}$	$\frac{1}{C_{LIC}} = \frac{1}{C_a} + \frac{1}{C_c}$ $C_a \gg C_c = C_{AC}, C_{LIC} = C_{AC}$ $E = \frac{C_{LIC} V_{LIC}^2}{2} = \frac{C_{AC} V_{LIC}^2}{2}$
<ul style="list-style-type: none"> • Cathode : Active Carbon • Anode : Active Carbon • Voltage : 0 ~ 2.7 V 	<ul style="list-style-type: none"> • Cathode : Active Carbon • Anode : Lithium Titanate • Voltage : 0 ~ 2.8 V 	<ul style="list-style-type: none"> • Cathode : Active Carbon • Anode : Li-doped Graphite • Voltage : 2.2 ~ 4.2 V

Fig. 3. Structure and characteristics of supercapacitor.

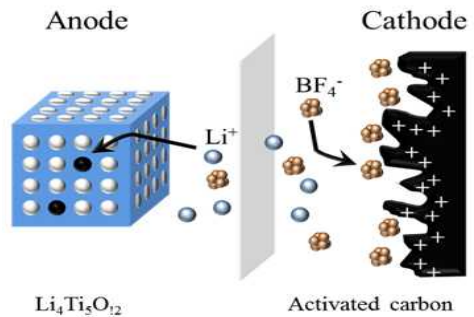


Fig. 4. The structure and mechanism of hybrid supercapacitor.

슈퍼커패시터를 적용하였으며 하이브리드 슈퍼커패시터 양극으로 사용되는 활성탄 전극에는 이온의 물리적 흡·탈착반응에 의한 전기 이중층반응(물리반응)에 의하여 전하를 저장하며, 반대 전극인 리튬계 전이금속 산화물에서는 리튬의 삽입·탈리반응(화학반응)에 의하여 전하를 저장한다 [9,10].

리튬 티타늄계 금속 산화물 하이브리드 슈퍼커패시터의 주요 특징으로는 전기이중층 커패시터에 비하여 체적당 용량이 2.5배로서 에너지 밀도가 높다는 장점과 이차전지에 비하여 출력 밀도, 충, 방전 효율, 수명이 우수하다는 장점을 가지고 있다. 반면에 전기이중층 커패시터에 비하여 출력 밀도가 낮고 충, 방전 횟수가 50,000회로서 전기이중층 커패시터에 비하여 낮다는 단점을 가지고 있으며 이차전지에 비하여 에너지 밀도가 낮은 단점을 가지고 있다 [11-13].

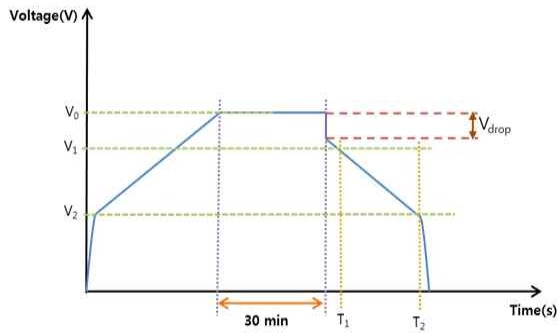


Fig. 5. Charge and Discharge Curve of hybrid supercapacitor.

그림 5는 하이브리드 슈퍼커패시터의 충, 방전 곡선을 나타낸 것으로서 하이브리드 슈퍼커패시터는 전기 이중층 커패시터와 달리 이차전지와 같이 음극과 양극 전위차에 의해 동작 전압 영역이 1.5~2.8 V로 제한된다. 하이브리드 슈퍼커패시터의 정전 용량 및 ESR_{DC}은 식 (1), (2)를 통하여 구할 수 있다.

$$C = (I \times \Delta T) / \Delta V \quad (1)$$

$$R_{esr} = V_{drop} / I \quad (2)$$

- C: 정전 용량
- I: 방전 전류
- R_{esr}: 등가 직렬저항

본 실험에서 2.8 V, 1,000 F 하이브리드 슈퍼커패시터 제작을 위하여 집전체로 20 μm 두께를 가지는 알루미늄박에 양극으로는 200 μm 활성탄 전극을 음극으로는 80 μm 리튬 티탄산화물 전극을 사용하였다. 제조 공정으로 일반적인 슈퍼커패시터 공정을 적용하였으며 전해액으로는 1.5 M LiBF₄/ACN 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

표 3에 실험을 통하여 제작된 하이브리드 슈퍼커패시터 셀의 전기적 특성 및 크기를 나타내었으며 그림 6에 C-rate 따른 방전 특성 곡선을 나타내었다. 실험 결과 C-rate가 증가할수록 방전 시간이 감소됨을 볼 수 있으며 10 A부터는 급격히 방전 전류가 감소함을 볼 수 있다. 적절한 방전 전류로는 1~5 A에서 동작시키는 것이 적절하다고 판단된다.

Table 3. Properties of hybrid supercapacitor cell.

Available Rated Voltage	1.5~2.8 V	Capacitance	1,000 F
DC ESR	7 mΩ	AC ESR (1 kHz)	4.5 mΩ
Weight	0.067 kg	Dimension (mm)	35 (D,Φ)×60 (H)

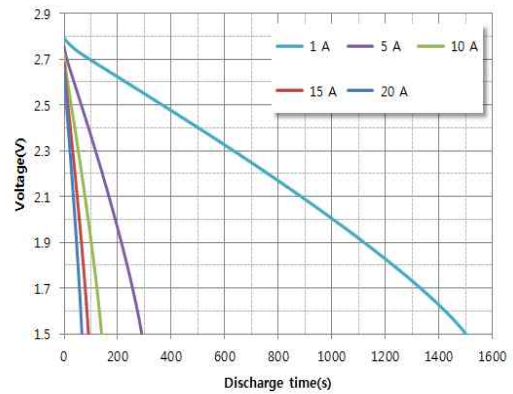


Fig. 6. Discharge curve according to C-rate of hybrid supercapacitor.

A사 비상 유도등 특성 분석 결과 정전 시, 즉 예비 전원 사용 시에는 LED 광원에서 소비되는 전력을 그림 7과 같이 나타남을 볼 수 있었다.

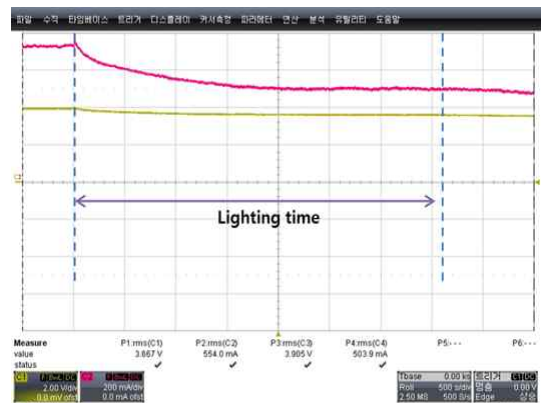


Fig. 7. Experimental waveform curve of emergency condition using Ni-Cd battery for A-company product.

그림 7의 파형을 분석해 보면 처음에는 약 2.9 W로 방전이 시작되지만 소방법 기준의 유효 점등시간

인 60분 후에는 약 1.9 W의 전력을 LED 유도등에서 소모하는 것을 확인할 수 있다. A사 제품의 경우 이와 같은 결과를 바탕으로 비상 시 LED 유도등에 약 1.9 W 이상의 전력이 공급된다면 화재 시 유효 점등 시간 동안의 유도등의 밝기가 조명 기준에 적합하다는 것을 알 수 있다. A사 비상 유도등 실험 결과를 바탕으로 비상시 정격전력을 2 W로하고 기존에 발표된 자료를 근거로 하여 다음과 같이 계산하여 하이브리드 슈퍼커패시터 모듈을 설계하였다 [13]. LED 동작 전압 및 하이브리드 슈퍼커패시터의 셀 전압을 고려하여 2개의 셀을 직렬로 설계하였다.

모듈의 전압은
 최대 전압 $U_{max}=5.6\text{ V}$
 최소 전압 $U_{min}=3.3\text{ V}$

이때 하이브리드 슈퍼커패시터 동작전압 영역은 $\Delta U=U_{max}-U_{min}=2.3\text{ V}$ 으로 하였다.

DC/DC 컨버터 효율 η 를 0.95로 하여 비상용 전원이 요구되는 평균 전류를 식 (3)으로 구하였다.

$$I_{avg}=(I_{max}+I_{min})/2= \{2/(3.3 \times 0.95)\} + \{2/(5.6 \times 0.95)\} / 2 = 0.507\text{ A} \quad (3)$$

하이브리드 슈퍼커패시터의 내부 저항에 따른 전압 강하를 식 (4)와 같이 고려하고

$$U_{esrmax}=R_{esr} \times I_{max}=R_{esr} \times \{P/(U_{min} \times k)\} \quad (4)$$

$$U_{esrmax}=0.02 \times \{2/(3.3 \times 0.8)\}=0.015\text{ V}$$

하이브리드 슈퍼커패시터의 방전 특성을 고려하면 실제 동작전압 영역은 식 (5)와 같다.


$$\Delta U=\{i \times (dt/C)\} + (I_{max} \times R_{esr}) \quad (5)$$

식(5)를 이용하여 LED 비상등이 1시간 동작하는데 필요한 정전 용량 C는 다음과 같다.

$$C=(I_{avg} \times t) / \{\Delta U - (I_{max} \times R_{esr})\}$$

$$=(0.507 \times 3600) / (2 - 0.015) = 798.7\text{ F}$$

Table 4. Properties of hybrid supercapacitor module.

Image			
			
Available Rated Voltage	3.3~5.6 V	Capacitance	1,000 F
DC ESR	20 mΩ	AC ESR (1 kHz)	23.5 mΩ
Weight	0.268 kg	Dimension (mm)	170(L)×40(W) ×70(H)

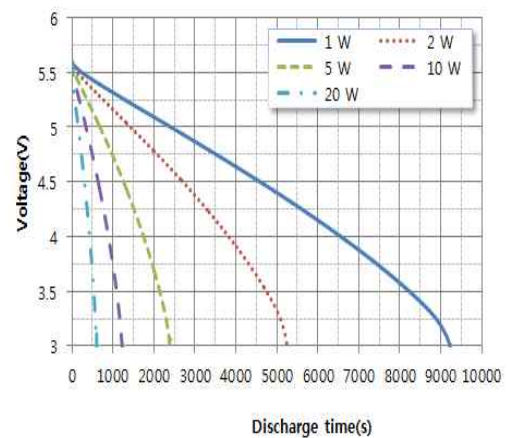


Fig. 8. Discharge curve according to out power of hybrid supercapacitor module.

본 논문에서는 비상용 전원의 수명을 10년으로 하고 하이브리드 슈퍼커패시터의 10년 후 에이징 상수(k)를 0.8로 하여 최종 요구 정전 용량을 998 F으로 확정하였다. 설계 결과를 이용하여 2.8 V, 1,000 F 하이브리드 슈퍼커패시터 셀 4개를 2직렬 2병렬로 설계, 제작하였다.

표 4에 실험을 통하여 제작된 하이브리드 슈퍼커패시터 모듈의 외관, 전기적 특성 및 크기를 나타내었다.

그림 8은 제작된 하이브리드 슈퍼커패시터 모듈을 상온에서 방전 전력 따른 방전 시간을 측정한 결과로서 설계식과 유사한 결과를 보이고 있다. 실험 결과 2 W로 방전 시 1시간 40분 동안 방전이 가능하며 설계에서 고려한 에이징 상수를 고려한 10년 후에도 1시간 10분 동안 출력이 가능함을 알 수 있다.

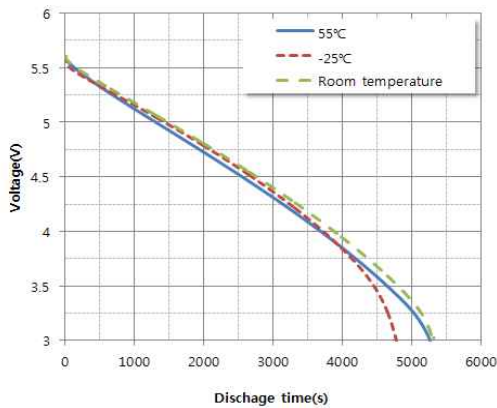


Fig. 9. Discharge curve according temperature of hybrid supercapacitor module.

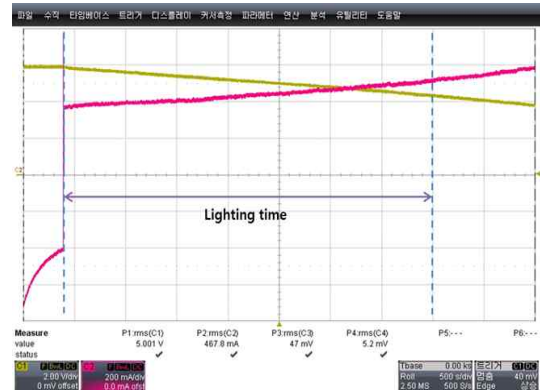


Fig. 11. Experimental waveform curve of emergency condition using hybrid supercapacitor module for A-company product.

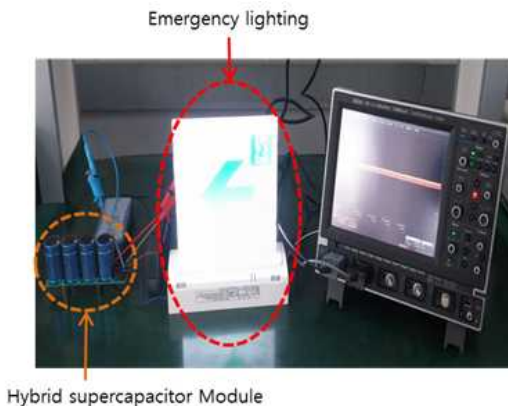


Fig. 10. Photograph of the experimental using hybrid supercapacitor module for A-company product.

그림 9는 제작된 모듈을 2 W로 방전 시 사용 온도에 따른 방전 특성 곡선으로 -25°C , 55°C 에서도 설계 규격에 만족함을 볼 수 있으나 -25°C 에서는 방전 시간이 줄어드는 것을 볼 수 있으며 설계 시 온도환경 조건도 고려하여야 할 필요가 있음을 확인할 수 있었다.

그림 10은 제작된 하이브리드 슈퍼커패시터 모듈을 적용하여 LED 비상 유도등 방전 실험을 한 사진이다.

그림 11은 실험 파형으로 2 W 정출력 방전 시 유효 점등 시간인 60분 이상 동작함을 확인하였다. 실험 결과 상온에서는 77.5분, 고온 조건($55 \pm 2^{\circ}\text{C}$)에서도 이와 비슷한 78분간 동작하였으며 저온 조건($-25 \pm 3^{\circ}\text{C}$)에서는 73분 동안 동작하여 기존에 적용된 니켈 카드뮴 전지와 유사한 동작 특성을 보이고 있다.

저온 및 고온에서 용량 감소는 비상등용 슈퍼커패시터 규정에서 제시된 $\pm 30\%$ 이내이고, 비상 시 필요한 유효 점등 시간인 60분 이상의 시간 동안 사용이 가능하다는 것을 확인하였다 [14]. 이와 같은 결과는 하이브리드 슈퍼커패시터 모듈을 적용하여서 LED 비상등 전원 사용 가능성을 확인하였다.

4. 결론

본 실험에서는 LED 유도등의 예비 전원으로 주로 사용되는 니켈 카드뮴전지를 대신하여 높은 충, 방전 효율, 장 수명, 고출력 및 친환경 소재를 사용한 친환경 하이브리드 슈퍼커패시터를 제안하여 사용 가능 여부를 확인하였다. 2.8 V, 1,000 F 하이브리드 슈퍼커패시터 셀 4개를 2직렬 2병렬로 설계, 제작하여 2 W 정출력 방전 시 유효 점등시간인 60분 이상 동작함을 확인하였다. 실험 결과 상온에서는 77.5분, 고온조건($55 \pm 2^{\circ}\text{C}$)에서도 이와 비슷한 78분 동작하였으며 저온조건($-25 \pm 3^{\circ}\text{C}$)에서는 73분 동안 작동하여 기존에 적용된 니켈 카드뮴전지와 유사한 동작 특성을 보이고 있다.

저온 및 고온에서 용량 감소는 비상등용 슈퍼커패시터 규정에서 제시된 $\pm 30\%$ 이내이고, 비상 시 필요한 유효 점등시간인 60분 이상의 시간 동안 사용이 가능하다는 것을 확인하였다. 향후 소방 분야에서도 우수한 출력 특성, 높은 에너지 효율, 빠른 응답 특성 및 친환경 제품으로서 LED 조명기구뿐만 아니라 다양한 분야에서 활용될 것으로 예상된다.

감사의 글

본 연구는 한국에너지기술평가원에서 지원하는 에너지 기술개발사업 (과제번호: 20142020103060)으로 수행된 과제임. (과제명: 인터넷 데이터 센터(IDC) 전력 품질 안정화를 위한 50 kw급 하이브리드 슈퍼커패시터 ESS 모듈 개발)

REFERENCES

- [1] EN 50172 - Emergency Escape Lighting Systems (2004).
- [2] EN 1838: Lighting Applications - Emergency Lighting (2000).
- [3] G. M. Lee and J. R. Yoon, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **26**, 22 (2013).
- [4] *LED Lighting and Supercapacitors KEMET Corporation* (2013).
- [5] N. Narendran, N. Maliyagoda, L. Deng, and R. Pysar, *SPIE Proceedings*, **4445**, 137 (2001).
- [6] 4 Amp Supercapacitor Flash LED Driver http://www.onsemi.com/pub_link/Collateral/CAT3224-D.PDF (2009).
- [7] B. G. Lee and J. R. Yoon, *Journal of Electrical Engineering & Technology*, **7**, 207 (2012). [DOI: <http://dx.doi.org/10.5370/JEET.2012.7.2.207>]
- [8] B. G. Lee and J. R. Yoon, *Electron. Mater.*, **9**, 871 (2013). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s13391-013-6032-4>]
- [9] J. H. Jeong, U. C. No, H. G. Kim, and T. W. Jeon, *The Journal of the Korean Institute of Power Electronics*, **17**, 5 (2012).
- [10] H. W. Chun and I. K. You, *Electronics and Telecommunications Trend*, **126**, 186 (2014).
- [11] J. K. Lee and J. R. Yoon, *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, **15**, 2586 (2015). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1166/jnn.2015.10258>]
- [12] D. Cericola and R. Kötz, *Electrochimica Acta*, **72**, 1 (2012). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.electacta.2012.03.151>]
- [13] S. H. Lee, H. K. Kim, Y. S. Yun, J. R. Yoon, S. G. Lee, and Y. H. Lee, *International Journal of Hydrogen Energy*, **39**, 16569 (2014). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.05.072>]
- [14] Technical Standards for Type Approval and Production Tests of the Leading Lights, *National Emergency Management Agency*, 2014-26 (2014).