

유사 오프가스에 의한 오프가스 센서의 오동작 방지 알고리즘에 관한 연구

황소연^{**}, 유현상^{*}, 최형석^{*}, 원종홍^{*}, 노대석^{*}

^{*}한국기술교육대학교, ^{**}㈜티팩토리

e-mail:conishwang@gmail.com

A Study on the Malfunction Prevention Algorithm of Off-Gas Sensor by Irrelevant Gases

So-Yeon Hwang^{**}, Hyeon-Sang Yu^{*}, Hyoung-Seok Choi^{*}, Jong-Heung Won^{*}, Dae-Seok Rho^{*}

^{*}Korea University of Technology and Education, ^{**}TFactory

요 약

정부의 녹색성장 및 탄소 중립 정책에 따라, 대용량 ESS(energy storage system)의 보급이 급속히 확산되고 있지만, 2017년 8월부터 시작된 ESS의 화재사고로 인하여 관련 업계가 큰 타격을 받고 있다. 국외 ESS의 화재사고 분석 보고서에 따르면, 배터리에서 발생하는 오프가스 검출을 통해 리튬이온전지의 열폭주를 방지할 수 있고, 이를 통해 에너지저장 장치의 화재를 예방할 수 있다고 보고되고 있다. 여기서, 오프가스 구성 성분은 일상생활에서 쉽게 접할 수 있는 제품에도 포함되어 있어, 유사 오프가스 성분으로 인해 오프가스 검출장치가 오동작 될 가능성이 있는데, 계통에서 운용 중인 ESS가 검출장치의 동작으로 비상정지되면 손실이 발생 될 수 있어, 유사 오프가스 대책 방안이 요구된다. 따라서, 본 논문에서는 리튬이온전지의 오프가스 및 열폭주 메커니즘을 분석하고, 열폭주를 사전에 방지할 수 있는 리튬이온전지 오프가스 검출방안과 유사 오프가스에 의한 오동작 방지 알고리즘을 제안하며, 이를 바탕으로 리튬이온전지용 오프가스 검출장치를 구현한다. 또한, 오프가스 검출장치의 특성을 분석하는 시험장치를 바탕으로 ESS용 리튬이온전지의 열폭주 특성을 비롯하여, 오프가스 검출장치 특성과 오프가스 오동작 방지특성을 분석한 결과, 효과적으로 리튬이온전지의 오프가스를 검출하고, 유사 오프가스로 인한 오동작을 방지할 수 있어, 본 논문에서 제안한 리튬이온전지 열폭주 방지용 오프가스 검출장치 및 알고리즘의 유효성을 알 수 있었다.

1. 서 론

2015년 유엔기후변화 회의에서 채택된 파리 협정 이후, 우리나라도 재생에너지 3020 이행계획을 수립하여 재생에너지 비중 증가를 위해 힘쓰고 있지만, 재생에너지 발전의 핵심 장치인 ESS(energy storage system)에서 현재까지 총 37건의 화재사고가 발생하여 많은 재산피해가 보고되고 있다[1-2]. ESS의 화재는 리튬이온전지의 열폭주로 인해 화재 규모가 커지며, 기존의 소화설비로 화재를 소화·진압할 수 없어 리튬이온전지의 열폭주를 사전에 방지하는 연구가 요구되고 있다 [3]. 한편, 국외 ESS의 화재사고 분석 보고서에 의하면, 전지에서 발생하는 오프가스 검출을 통해 리튬이온전지의 열폭주를 방지하여 ESS의 화재를 예방할 수 있다고 한다[4]. 오프가스 구성 성분은 일상생활에서 쉽게 접할 수 있는 제품에도 포함되어 있어, 유사 오프가스 성분으로 인해 오프가스 검출장치가 오동작 될 가능성이 있는데, 계통에서 운용 중인 ESS가 검출장치의 동작으로 비상정지되면 손실이 발생 될 수 있어, 유사 오프가스 대책 방안이 요구된다. 따라서, 본 논문에서는

ESS용 리튬이온전지의 열폭주 메커니즘을 분석하여 오프가스 및 열폭주의 특성을 제시한다. 또한, 복합센서를 활용한 오프가스 검출방안 및 유사 오프가스에 의한 오동작 방지방안을 적용한 리튬이온전지의 열폭주 방지용 오프가스 검출 알고리즘을 제안한다. 이를 바탕으로, 오프가스 검출장치의 특성을 분석하는 시험장치를 구현하여, ESS용 리튬이온전지의 열폭주 특성을 비롯하여, 오프가스 검출장치 특성과 오프가스 오동작 방지특성을 분석한 결과, 효과적으로 리튬이온전지의 오프가스를 검출하고, 유사 오프가스로 인한 오동작을 방지할 수 있어, 본 논문에서 제안한 유사 오프가스에 의한 오프가스 센서의 오동작 방지 알고리즘의 유효성을 알 수 있었다.

2. 리튬이온전지의 오프가스 및 열폭주 메커니즘

ESS용 리튬이온전지의 오프가스와 열폭주가 발생하는 단계는 그림 1과 같이 스트레스, 벤딩, 연기발생, 열폭주로 분류된다. 먼저, 스트레스 단계에서는 셀에 전기적, 열적, 물리적

외부 스트레스가 가해지거나, 품질 불량으로 인하여 셀 내부의 온도가 상승한다. 이때, 셀 내부의 온도 상승이 지속되면, 셀의 전해질이 기화되어 오프가스 기체로 변화된다. 이 단계의 오프가스 성분은 표 1과 같이 전해질 증기성분과 분해 및 반응 가스성분으로 구성되며, 이들 성분이 증가할수록 셀 내부의 압력도 증가한다. 여기서, 분해가스는 전해질 성분의 분자식이 고온/고압에 의해 분리되어 새로운 가스로 생성되는 것이고, 반응 가스는 전해질 가스와 양극재 등이 고온/고압에 의해 반응하여 새로운 가스로 결합되는 것이다.



[그림 1] 리튬이온전지의 열폭주 발생 단계

또한, 벤팅 단계는 셀의 내부 압력이 증가하여 일정 압력 값을 초과하는 경우, 셀의 보호기능 중 하나인 벤팅에 의하여 전해질 가스와 분해 및 반응 가스 등을 셀 밖으로 배출시키는 현상을 말한다. 이 단계에서 오프가스의 성분은 리튬이온전지의 종류(LCO, NMC, LFP, 등)와 스트레스 조건, 환경 조건, SOC, 등에 따라 다르게 발생되며, 벤팅 발생의 초기에는 기화된 전해질 성분으로 구성되고, 시간이 경과 할수록 분해 및 반응 가스성분의 비율이 증가한다.

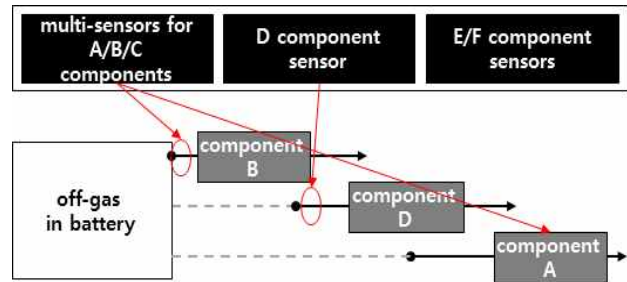
[표 1] 오프가스 기체의 구성 성분

전해질 증기	분해 가스	반응 가스
diethyl carbonate ethylene carbonate dimethyl carbonate ethyl Methyl carbonate propylene carbonate vinylene carbonate etc	butane acetylene ethylene methane hexane benzene toluene etc	hydrogen carbon monoxide etc

한편, 연기발생 단계는 벤팅 발생 이후, 지속적인 스트레스로 인하여 셀의 내부 온도가 증가하고 분리막이 녹아 순간적으로 다량의 연기가 발생하는 현상을 말한다. 여기서, 내부 단락이 발생하는 경우, 고열에 의해 점화되어 화재가 발생할 수 있는데, 이러한 현상을 열폭주(thermal runaway) 또는 열폭주 단계라고 한다.

3. 유사 오프가스에 의한 오프가스 센서의 오동작 방지 알고리즘

대다수의 상용화된 ESS용 리튬이온전지의 BMS는 벤팅 단계의 오프가스를 검출하기 어려우므로 오프가스를 검출할 수 있는 센서시스템이 추가적으로 요구된다. 여기서, 오프가스는 다양한 성분으로 이루어진 가스이고, 사고에 따라 발생하는 성분의 종류와 순서가 다르므로, 특정 오프가스 성분 검출 센서만 사용할 경우, 오프가스 조기 검출에 실패할 가능성이 있다. 따라서, 그림 2와 같이 초기에 오프가스 성분을 검출하지 못하더라도, 이후 발생하는 오프가스 성분 검출을 통해 최대한 신속하고 정확하게 오프가스 발생을 판단할 수 있다. 이러한 기능을 통하여 일부 센서의 고장으로 인해 특정 성분을 검출하지 못하는 경우, 다른 정상적인 센서들에 의하여 오프가스 성분을 검출할 수 있다.



[그림 2] 복합센서로 구성된 오프가스 검출장치의 오프가스 검출방안

또한, 오프가스 구성 성분은 구두약이나 접착제, 청소용 세정제 등 일상생활에서 쉽게 접할 수 있는 제품에도 포함되어 있어, 유사 오프가스 성분으로 인해 오프가스 검출장치가 오동작 될 가능성이 있다. 따라서, 계통에서 운용 중인 ESS가 검출장치의 동작으로 비정상적되면 손실이 발생 될 수 있어, 유사 오프가스 대책 방안이 요구된다. 일반적으로 ESS용 리튬이온전지는 전지실과 같은 독립된 공간에 설치되어 외부와 내부를 구분할 수 있으므로, 리튬이온전지에서 발생하지 않은 유사 오프가스는 전지실 외부에서 유입되는 기체이다. 또한, 유사 오프가스를 검출하기 위해서는 출입문, 배기팬, 과압 배출구 등 외기가 유입될 수 있는 위치에 오검출 방지용 오프가스 검출장치를 설치해야한다. 한편, 리튬이온전지에서 발생하는 오프가스와 외부에서 유입되는 유사 오프가스를 구분하기 위한 경우의 수를 나타내면 표 2와 같다. 여기서, 오프가스 미발생은 두 센서 모두 동작하지 않는 상태이며, 오프가스 발생은 오프가스 센서만 동작한 상태를 나타낸다. 또한, 유사 오프가스 유입은 오검출방지 센서만 동작한 상태이며, 오프가스 발생 및 유사 오프가스 유입은 두 센서 모두 동작한 상태

를 나타낸다. 따라서, 오프가스 센서와 유사 오프가스 센서가 동시에 동작하는 경우, 유사 오프가스에 의한 오프가스 센서의 오동작을 방지할 수 있음을 알 수 있다.

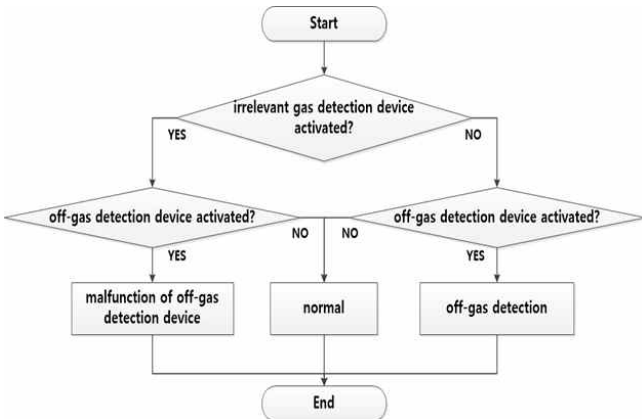
[표 2] 오프가스와 유사 오프가스에 의한 오동작 검출 사례

오프가스 센서	유사 오프가스 센서	상태	판단상태
미검출	미검출	오프가스 미검출	정상
검출	미검출	오프가스 검출	정상
미검출	검출	유사 오프가스 검출	정상
검출	검출	오프가스 및 유사 오프가스 검출	오동작

상기에서 제시한 오프가스 검출방안을 바탕으로, 리튬이온 전지의 오프가스를 정확하고 신속하게 검출하기 위한 알고리즘을 구체적으로 나타내면 다음과 같다.

- [Step 1] 리튬이온전지의 오프가스 성분을 검출할 수 있는 n개의 센서로 오프가스 검출장치를 구성한다.
- [Step 2] 외기유입구에 설치된 유사 오프가스 검출장치에 대하여, 한 개의 센서라도 오프가스를 검출하면 유사 오프가스로 판단하고 [Step 3]으로 이동한다. 만약, 검출되지 않는 경우 [Step 4]로 이동한다.
- [Step 3] [Step 1]에서 구성한 오프가스 검출장치에 대하여, 어느 하나의 센서라도 오프가스를 검출하면 오프가스와 유사 오프가스를 모두 검출한 것으로 판단하고 [Step 5]로 이동한다.
- [Step 4] [Step 1]에서 구성한 오프가스 검출장치에 대하여, 어느 하나의 센서라도 오프가스를 검출하면 오프가스만 검출한 것으로 판단하고 [Step 5]로 이동한다.
- [Step 5] [Step 3]에 의하여 오프가스 센서의 오동작 상태로 판정하고, [Step 4]에 의하여 오프가스 발생 상태로 판정하며, 나머지 경우는 정상상태로 판정한다.

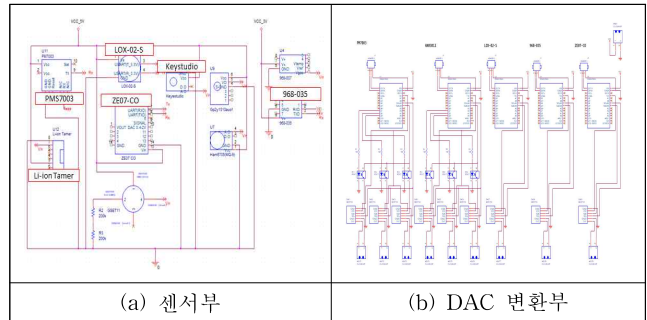
따라서, 상기의 알고리즘을 플로우차트로 나타내면 그림 3과 같다.



[그림 3] 리튬이온전지 열폭주 방지용 오프가스 검출 알고리즘

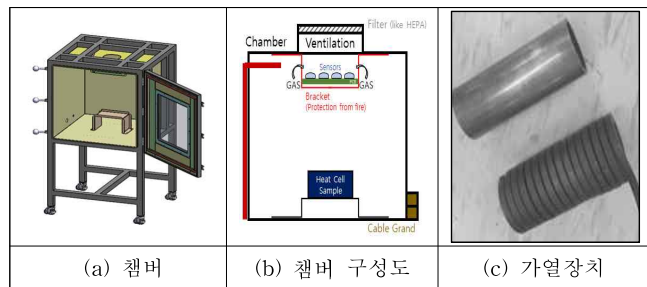
4. 오동작을 고려한 오프가스 검출장치 구현

오프가스 검출장치는 그림 4와 같이 센서부와 DAC 변환부로 구성된다. 그림 4(a)의 센서부는 먼지와 산소, 연기, 오프가스, 일산화탄소, 알코올 센서로 구성된다. 일반적인 센서는 아날로그 출력값을 디지털변환 없이 사용하지만, 일부 센서는 그림 4(b)와 같이 아날로그값으로 변환하는 DAC (digital to analog convert) 장치를 사용하여 측정한다.



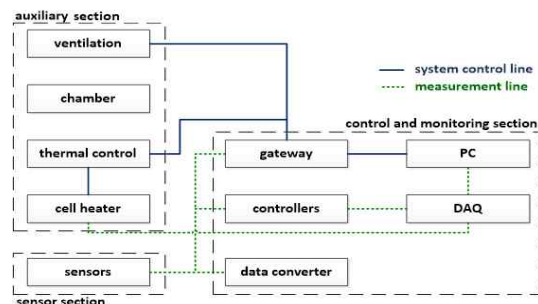
[그림 4] 오프가스 검출장치 회로도

리튬이온전지 오프가스 및 열폭주 시험을 수행하기 위한 보조시험장치는 그림 5와 같이 챔버시스템과 가열장치로 구성된다. 챔버시스템은 배터리 열폭주를 고려하여 강철로 견고하게 제작하고, 배기팬과 필터 등을 설치한다. 가열장치는 배터리에 열적 스트레스를 전달하기 위해 코일 히터와 열선 등으로 구성된다.



[그림 5] 보조시험장치 구성

리튬이온전지 오프가스 검출장치의 전체 시스템은 그림 6과 같이 구성된다.



[그림 6] 오프가스 검출장치 전체 구성도

5. 시험 결과 및 분석

5.1 시험조건

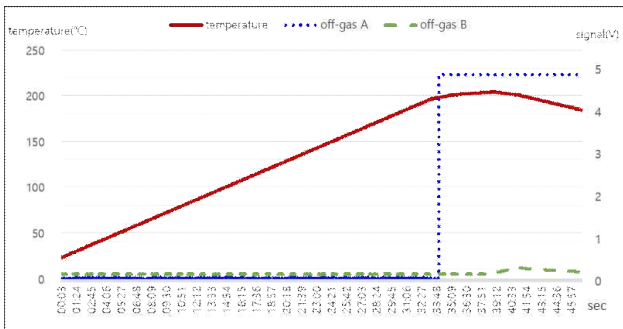
본 논문에서 제시한 알고리즘 및 검출장치의 특성을 확인하기 위하여, 시험조건을 나타내면 표 3과 같다. 여기서, 시험 1은 오프가스 검출 특성을 확인하기 위해 SOC 100%의 국내 리튬이온전지 제조사의 원통형 전지를 사용하고, UL 9540A 6절 시험방법을 참고하여 전지 외부 온도를 분당 5~7°C 가열한다. 시험 2는 오동작 방지특성을 확인하기 위해 유사 오프가스를 투입하는 시험으로, 유사 오프가스로는 디에틸카르보네이트 (diethyl carbonate, DEC) 용액을 사용한다.

[표 3] 시험조건

항목	시험 1	시험 2
리튬이온전지 시료	원통형 셀	DEC 용액
시료 파라미터	SOC 100%	99.5%
외부 스트레스 요인	외부 가열 (UL 9540A 참고)	자연상태의 증기
외부 스트레스 파라미터	분당 5~7°C 상승	자연대류

5.2 오프가스 검출 특성분석

오프가스 검출장치의 동작 특성을 나타내면 그림 7과 같다. 여기서, 시험 시작 후 34분경 소음과 함께 벤팅이 발생함을 알 수 있다. 또한, 약 4초 후 A 오프가스 검출 센서에서 오프가스 알람이 발생되고, 벤팅 발생 4분 후, B 오프가스 검출 센서에서 일산화탄소가 검출되어 오프가스 검출장치가 정상적으로 동작됨을 알 수 있다. 한편, 오프가스 검출에 의하여 외부 가열을 중지하고 39분이 지나면 전지의 표면온도가 하락하기 시작하여, 열폭주가 발생하지 않음을 알 수 있다. 따라서, 리튬이온전지의 오프가스 검출 이후 외부 스트레스 요인을 제거하면 열폭주가 발생하지 않음을 알 수 있었다.

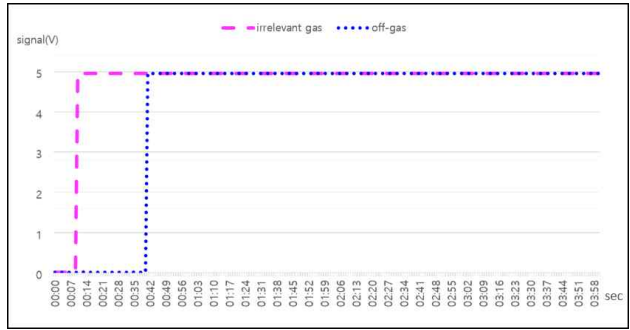


[그림 7] 오프가스 검출 특성 그래프

5.3 오검출 방지 특성분석

그림 8과 같이, 약 9초 후 외기유입구에 설치된 유사 오프가스 검출장치에서 유사 오프가스가 검출되고, 약 34초 후, 리튬이온전지에 설치한 오프가스 검출장치에서 오프가스가 검출됨을 알 수 있다. 따라서, 오프가스 센서와 유사 오프가스

센서가 동시에 동작하는 경우, 유사 오프가스에 의한 오프가스 센서의 오동작을 방지할 수 있음을 확인할 수 있었다.



[그림 8] 오프가스 오동작 방지특성

6. 결론

본 논문에서는 유사 오프가스에 의한 오프가스 센서의 오동작을 방지하기 위하여, 리튬이온전지의 오프가스 검출 알고리즘을 제안하고, 알고리즘이 반영된 오프가스 검출장치를 개발하였다. 이를 바탕으로 오프가스 검출 시험을 수행한 결과, 오프가스 검출 시험에서는 오프가스 검출장치가 벤팅 발생 직후 바로 오프가스를 검출하였고, 유사 오프가스에 의한 오동작 방지 시험에서는 유사 오프가스와 오프가스를 모두 검출해내었기 때문에, 제안한 알고리즘 및 검출장치의 유용성을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구(No.20206910100090 & No.20215910100030)로서, 관계 부처에게 감사드립니다.

참고문헌

- [1] 산업통상자원부, “ESS 사고원인 조사결과 및 안전강화 대책 발표”, 보도자료, 2019.06.
- [2] IEC 62933-5-1, “Electrical energy storage (EES) systems - Part 5-1: Safety considerations for grid-integrated EESsystems - General”, 2017
- [3] James B. Biggins, “Standard for the Installation of Stationary Energy Storage System”, NFPA, U.S., NFPA 855, 2020 Edition, vol. 3, no. 3, pp.7, 2020.4.
- [4] Nexceris, LLC, “Off-gas detection for Lithium-ion Battery System”, Data Pack for NFPA855 Committee, July 11, 2018.