J. Electr. Electron. Mater.
Vol. 39, No. 1, pp. 52-58 January 2026
doi: https://doi.org/10.4313/JEEM.2026.39.1.6
ISSN 1226-7945(Print), 2288-3258(Online)

Regular Paper

전기차 해상운송 안전성 확보를 위한 리튬이온 배터리 열 폭주에 따른 오프가스 폭발 특성 연구

박정훈, 박인철

한국조선해양기자재연구원

A Study on the Explosion Characteristics of Off-Gases from Lithium-Ion Battery Thermal Runaway for EVs Marine Transport Safety

Jeong-Hoon Park and In-Chul Park

Korea Marine Equipment Research Institute, Ulsan 44776, Korea

(Received November 17, 2025; Revised November 27, 2025; Accepted December 1, 2025)

Abstract: As electric vehicles (EVs) are rapidly adopted worldwide, large numbers are now transported by sea on dedicated car carriers. With this trend, concerns are increasing about fires and explosions caused by battery thermal runaway during marine transport, while existing SOC limits before loading remain largely empirical. This study experimentally investigates gas generation and explosion characteristics of EV lithium-ion cells under thermal runaway conditions representative of enclosed vehicle decks. We identify and quantify the main off-gas components and clarify the flammability behavior and explosion limits of key combustible species. The results provide basic data for assessing EV battery accidents at sea and support the development of safer ventilation and gas-management strategies for ships.

Keywords: Electric vehicles (EVs), Lithium-ion batteries, Thermal runaway, Off-gas explosion characteristics, Marine transport safety

1. 서 론

최근 전기자동차(EV, electric vehicle) 수요가 증가함에 따라 선박을 통한 전기차의 대량 수출도 전 세계적으로 꾸준히 확대되고 있다. 그러나 운송 물량이 늘어남에 비례해 해상 운송 중 차량에 탑재된 배터리에서 원인 불명의 열 폭주가 발생하고, 이로 인한 화재 사고가 빈번하게 보고되고 있다 [1]. 대표적인 사례로, 2023년 M/V Fremantle Highway호에 선적된 전기차의 리튬이온 배터리에서 발생한 열 폭주로 대규모 화재가 일어나 선박이 전소·침몰하는 사고가 발생하였으며, 이로 인해 RO-RO 화물구역(roll-on/roll-off)에 적재된 전기차 배터리의 화재 위험성이 크게 부각되고 있다 [2]. 이러한 위험을 저감하기 위한 대응책의 하나로, 현재는 전기자동차를 선박에 탑재하기 전에 배터리 충전율(SOC, state of charge)을 50% 이하로 제한하는 관리 방안이 적용되고 있다 [3-5].

그러나 충전율 제한과 같은 운영상 관리 조치는 기본적인 위험 완화 수준에 머물고 있으며 [6,7], 실제로 배터리에서 열 폭주가 발생하였을 때, 어떤 가스가 어느 정도 분출되는지, 또 그 가스들이 어떤 폭발성을 가지는지에 대한 기초 데이터는 여전히 매우 부족한 실정이다 [8]. 특히 선박 차량 갑판과 같이 밀폐·반 밀폐된 공간에서는 배터리에

✉ In-Chul Park; icpark@komeri.re.kr

Copyright ©2026 KIEEME. All rights reserved.
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.

서 분출되는 가스의 조성과 폭발범위를 정확히 파악하는 것이 화재·폭발 위험평가, 환기 및 가스감지 설계, 비상대응 매뉴얼 수립을 위한 핵심 기초자료가 된다 [9].

실제 선박 적재 시에는 배터리 충전율(SOC, state of charge)을 50% 이하로 제한하고 있으나, 본 연구에서는 열폭주 발생 시 생성될 수 있는 가스량과 폭발성을 보다 보수적으로 평가하기 위해 배터리 충전율을 100% 조건에서 실험을 수행하였다. 일반적으로 배터리 충전율이 높을수록 배터리에 저장된 에너지가 크고 전해질 분해에 따른 가스 생성량 또한 증가하는 것으로 알려져 있어, 충전율 100% 조건은 가장 위험한 상황을 가정한 실험 조건으로서 기초 안전 데이터를 확보하는 데 더욱 적합하다고 판단된다.

이에 본 연구에서는 전기자동차 배터리의 최소 구성 단위인 셀을 대상으로 화재·폭발 시험을 수행하고, 열 폭주 과정에서 방출되는 오프가스(off-gas)를 포집하여 가스크로마토그래피(GC, gas chromatography)를 이용한 정성·정량 분석을 수행하고, 분석결과를 토대로 대표적인 폭발성 가스를 대상으로 혼합비를 조절하며 폭발범위를 실험적으로 도출하고자 한다.

본 연구 결과는 해상 운송 중 전기자동차 배터리 사고 시 가스 누출 및 2차 폭발 위험을 보다 과학적으로 평가하고, 선박의 설계 및 운항 단계에서 보다 정교한 안전기준과 대응 전략을 마련하는 데 중요한 기초자료로 활용될 수 있을 것이다.

2. 오프가스 분석 시험

2.1 시험 방법

전기자동차에 사용되는 리튬이온 배터리의 열 폭주 현상에 따른 오프가스 특성을 분석하기 위해 열적 남용과 같은 외부 요인에 의한 열 폭주 상황에서 배출되는 오프가스를 포집 하여 정량 및 정성 분석을 수행하였다. 이를 통해 열 폭주 시 발생하는 가스의 종류를 식별하고, 특히 2차 폭발의 영향을 평가하기 위하여 가연성 가스의 구성을 확인하였다.

그림 1은 본 연구에서 사용한 방출 가스 시험 장비이다. 배터리 열 폭주 시 발생하는 오프가스 분출로 인한 배터리의 이탈을 방지하기 위해 내부에 배터리를 고정하여 시험을 수행하였다.

표 1은 각 표준에서의 시험 조건을 비교한 것이다 [10,11]. 온도 상승률 오차 범위를 제외한 시험 조건이 동일하여, 배터리 셀 열 폭주 시험에서 광범위하게 적용되는 UL 9540A의 시험 기준을 채택하여 시험을 수행하였다.

시험에 사용된 리튬이온 배터리는 원통형배터리(INR 18650-25R)를 사용하였으며, 관련 활물질(전극 재료)의 경우 양극은 니켈 기반(Ni-based) 계열, 음극은 흑연(graphite)이고, 전해질 조성, 첨가제, 분리막 재료 등 내부 화학 사양은 영업비밀로 취급되어 정보를 찾을 수 없었다. 시험시료인 배터리의 공칭전압, 에너지 용량, 정격용량, 표준충전, 급속충전, 최대 연속 방전 전류, 방전 종지전압, 부피, 질량과 같이 시험에 사용된 일반적인 배터리 정보는 표 2와 같다.

시험 방법은 시험기 내부의 가열판 위 배터리 셀을 고정한 상태에서 가열판 히터를 이용하여 온도를 분당 4 ~ 7℃의 범위로 상승시켜, 리튬이온 배터리에 열적 이상 조건을 가하여 열 폭주를 발생시켰다. 열 폭주 시 발생하는 오프가

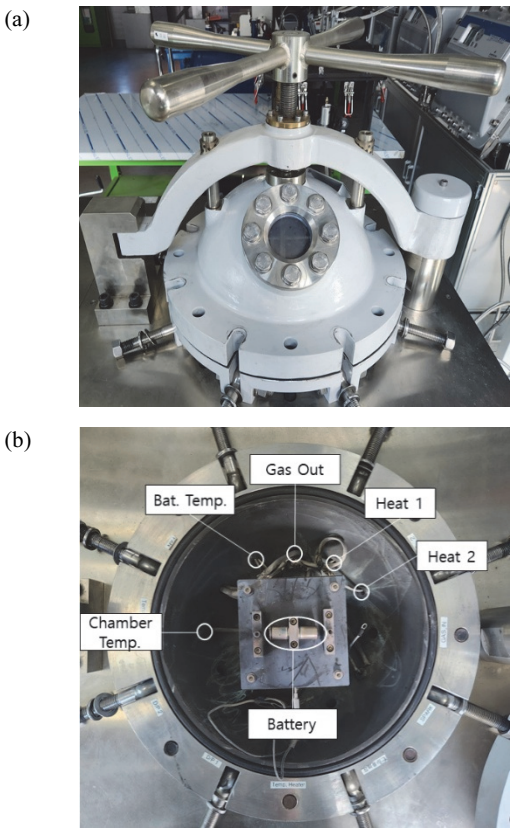

Fig. 1. Vent gas testing machine (a) out-side and (b) in-side.

Table 1. Thermal runaway test condition [10,11].

Standard	Temperature rise rate
UL 9540A	(4 ~ 7) ℃/min
SPC C KBIA-10104-05-7488	5 ℃/min

Table 2. Cylindrical battery (INR 18650-25R) specifications.

Item	Value
Nominal voltage	3.6 V
Energy capacity	9 Wh
Capacity	2.5 Ah
Standard charge	CCCV, 1.25 A, 4.20 ± 0.05 V, 125 mA cut-off
Rapid charge	CCCV, 4 A, 4.20 ± 0.05 V, 100 mA cut-off
Max. continuous discharge	20A (at 25℃), 60% at 250 cycle
Discharge cut-off voltage End of discharge	2.5 V
Volume	17.11 cm^3
Mass	45 g

(a)

(b)

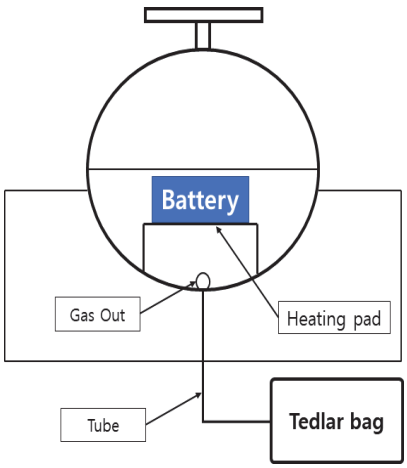

Fig. 2. (a) Vent gas test set-up and (b) test diagram.

스는 시험기의 가스 출구 포트를 통해 테들러 백으로 포집하였다(그림 2 참조). 포집된 가스는 가스크로마토그래피를 이용하여 정성 및 정량 분석을 하였으며, 시험은 배터리 충전율 100%로 충전된 원통형 배터리를 대상으로 2회 반복 수행하였다.

2.2 시험 결과

배터리 열 폭주 후 발생된 가스를 포집 후분석한 결과는 무기가스와 유기화합물로 구분하여 표 3과 4와 같이 정리하였다. 무기가스의 분석결과인 표 3은 열 폭주 시험 전에는 산소(O_2), 질소(N_2), 일산화탄소(CO), 이산화탄소(CO_2) 4종의 성분이 검출되었으며, 시험 후에는 메탄(CH_4)이 추가로 검출된 것을 확인할 수 있다. 이는 열 폭주 과정에서 배터리 내부에서 메탄이 생성된 것으로 추정된다. 시험 전후 가스 농도 변화를 비교한 결과, 산소의 농도가 10% 감소한 반면, 일산화탄소와 이산화탄소의 농도는 각각 3%, 9.95%, 증가한 결과를 나타내었다. 이는 열 폭주 시험 과정에서 연소에 참여한 산소가 일산화탄소와 이산화탄소로 전환되었기 때문으로 추정된다.

유기화합물 함량 분석 결과인 표 4는 벤젠류 유기화합물(BTEXS, Benzene, Toluene, Ethyl benzene, Xylenes, Styrene)로 알려진 휘발성 유기화합물이 연소 과정에서 다량 생성되는 것을 확인할 수 있었으며, 그 중 스타이렌(styrene)과 톨루엔(toluene)이 각각 14,000 μg/m^3, 10,900 μg/m^3으로 가장 많이 생성되는 것으로 시험결과 나타났다.

오프가스 내 폭발성 가스 성분을 분석한 결과, IEC 60079-20-1 국제 표준에서 제시하는 폭발성 가스는 총 8종이 검출되었고, 표 5에 정리하였다 [12]. 메탄, 일산화탄소, 벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠, 자일렌 계열, 스타이렌과 같은 가스 성분들은 모두 폭발 위험성을 가진 물질들로 분류되며, 이 중 메탄을 제외한 나머지 가스들은 독성 또는 발암성을 가지고 있다.

Table 3. Results of the off-gas analysis: inorganic gases.

Component	Before (%)	After (%)	Variation (%)
Oxygen	20	10	-10
Nitrogen	76	75	-1
Methane	-	0.27	0.27
Carbon monoxide	0.05	3.05	3
Carbon dioxide	0.05	10	9.95

Table 4. Results of the off-gas analysis: organic compounds.

Component	Generated amount ($\mu g/m^3$)
Benzene	3,700
Toluene	10,900
Ethyl benzene	6,600
m-Xylene	2,300
p-Xylene	2,400
o-Xylene	510
Styrene	14,000

Table 5. Explosive gas in off-gas.

No.	Component
1	Methane
2	Carbon monoxide
3	Benzene
4	Toluene
5	Ethyl benzene
6	m-Xylene
7	p-Xylene
8	Styrene

Table 6. Explosive gas types and flammable limit.

Component	LFL (vol/%)	UFL (vol/%)	Component
Methane	4.4	17.0	Methane
Carbon monoxide	10.9	74.0	Carbon monoxide
Benzene	1.2	8.6	Benzene
Toluene	1.0	7.8	Toluene
Ethyl benzene	0.8	7.8	Ethyl benzene
m-Xylene	1.0	7.0	m-Xylene
p-Xylene	0.9	7.6	p-Xylene
Styrene	1.0	8.0	Styrene

3. 폭발압력 시험

3.1 시험 방법

앞선 2장의 리튬이온 배터리의 열 폭주 현상으로 인해 발생하는 오프가스의 특성 분석 결과를 토대로 가연성 혼합가스를 제조하여 폭발시험을 수행하였다. 오프가스에 의한 2차 폭발의 위험성을 정량적으로 평가하기 위해 가연성 혼합가스의 부피 분율 변화에 따른 최대 폭발압력을 측정함으로써 잠재적 위험도를 정량화 하였다. 이를 통해 리튬이온 배터리의 열 폭주로 인한 오프가스 발생 시 2차 폭발 위험성을 시험적으로 규명하고자 하였다.

Qui 등 [13]은 리튬이온 배터리의 열 폭주 시 발생하는 오프가스의 폭발 한계 계산에 대해 세 가지 방법을 제안하였다. 첫 번째는 단일 가연성 가스의 폭발 한계를 계산하는 것으로, 흔히 경험적 공식 방법이라고도 한다. 두 번째는 여러 가연성 가스 혼합물의 폭발 한계를 계산하는 데 사용되는 것으로, 르 샤틀리에 공식법(L-C 공식)으로 알려져 있으며 식 (1)과 같다. 세 번째는 불활성 가스를 포함하는 가연성 가스 혼합물의 폭발 한계를 계산하는 것으로 혼합물에 불활성 가스가 있는 경우에도 식 (1)의 르 샤틀리에 공식을 사용하여 혼합물의 폭발 한계를 계산할 수 있다. 본 연구에서는 혼합가스의 폭발 한계를 계산하기 위해 식 (1)을 사용하여 폭발 하한(lower flammable limit, LFL) 및 폭발 상한(upper flammable limit, UFL)을 계산하였다.

$$(LFL)_{mix} = [\sum_{i=1}^{n} \frac{X_i}{(LFL)_i}]^{-1} \times \sum_{i=1}^{n} X \quad (1)$$

여기서 $(LFL)_{mix}$는 가스의 폭발 하한(vol.%)이며, X_i는 가스의 부피 분율(vol.%)이다.

표 6은 오프가스의 폭발 하한과 상한의 한계 계산을 위하여 오프가스 분석결과를 토대로 가연성 가스 8종에 대해 국제 표준인 IEC 60079-20-1을 기반으로 폭발 하한과 폭발 상한 값을 정리하였다 [12]. 해당 가연성 가스들은 폭발 하한과 폭발 상한 사이의 부피 분율에 있을 때 폭발이 발생함을 의미한다.

오프가스 중 8종의 가연성 가스 대해 부피 분율을 ppm 단위에서 vol.% 단위로 변환하였고 표 7에 단위 변환표로 정리하였다. 변환 과정에서는 1 $\mu g/m^3$는 0.001 ppm에 해당하며, 1 ppm은 0.0001 vol.%로 환산되었다. 단위 변화 결과, BTEXS (Benzene, Toluene, Ethyl benzene, Xylene, Styrene)로 알려진 휘발성 유기화합물의 경우, 열 폭주 시험 시 스타이렌과 톨루엔이 가장 많이 생성되었으나, 그 양이 각각 0.140 vol.%, 0.109 vol.%로 매우 미량인 것으로 확인되었다.

그 외 벤젠, 에틸벤젠, m-자일렌, p-자일렌의 경우 모두 0.1 vol.% 미만의 부피 분율로 검출되었다. 시험 결과, BTEXS 화합물의 부피 분율이 매우 낮아 혼합가스 제조 시

구현이 불가능하고 폭발 시 무시할 수 있는 수준으로 판단되었다. 따라서 최대 폭발압력 시험은 메탄과 일산화탄소를 기준으로 혼합 혼합가스를 제조하였다.

Table 7. Unit conversion.

Component	Measurement ($\mu g/m^3$)	ppm	Conversion (vol.%)
Methane	-	-	0.27
Carbon monoxide	-	-	3
Benzene	3,700	3.7	0.037
Toluene	10,900	10.9	0.109
Ethyl benzene	6,600	6.6	0.066
m-Xylene	2,300	2.3	0.023
p-Xylene	2,400	2.4	0.024
Styrene	14,000	14.0	0.140

고순도의 혼합가스 제조를 위해 무기가스 분석 결과를 기준으로 메탄과 일산화탄소의 부피 분율을 각각 30배 증가시켰다. 이러한 부피 분율 조정 결과, 메탄은 8 vol.%, 일산화탄소는 90 vol.%의 부피 분율로 설정되었다. 또한, 혼합물의 안정성을 확보하기 위해 2 vol.%의 질소를 안정화 가스로 첨가하여 시험용 가연성 혼합가스를 제조하였다.

본 연구에서는 그림 3과 같이 체적 0.0217 m^3 용량의 가스특성평가 시험 장비를 사용하여 시험을 수행하였다. 시험 방법은 먼저, 시험기에 산소를 주입하여 시험기 내 산소농도를 21%로 초기화한다. 그 후, 혼합가스를 주입하고 점화플러그를 작동시켜 폭발을 유도하고 폭발압력을 측정하였다(그림 4 참조).

각각의 배출가스 농도는 폭발 하한 미만일지라도, 가연성 혼합가스가 폭발범위를 충족할 때 실제 폭발이 발생하는지를 실험적으로 규명하고자 하였다. 이를 위해 본 시험에서는 시험기 내 혼합가스의 부피 분율을 산소 농도를 기준으로 산출하였다. 초기 시험기 내 산소의 부피 분율을

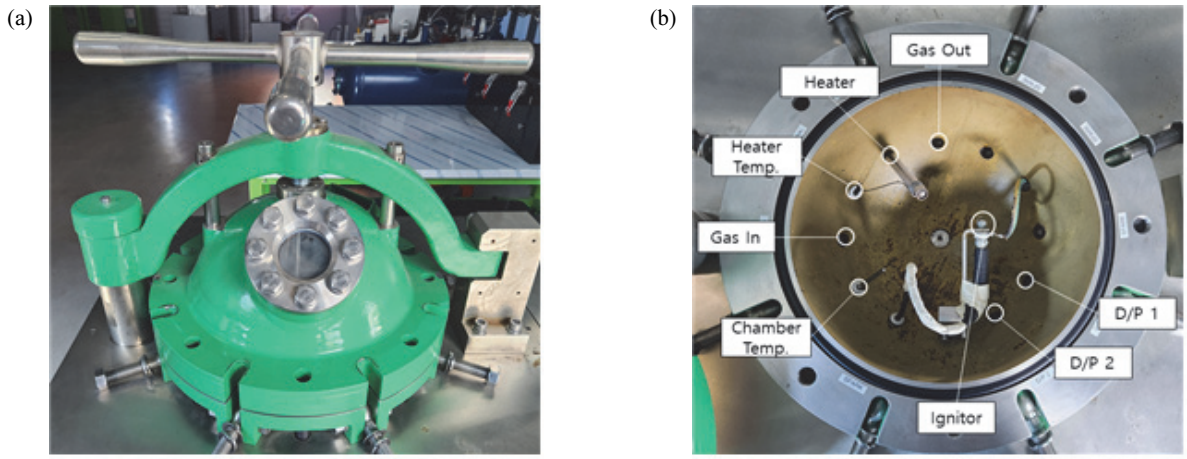

Fig. 3. Gas characteristics testing machine (a) out-side and (b) in-side.

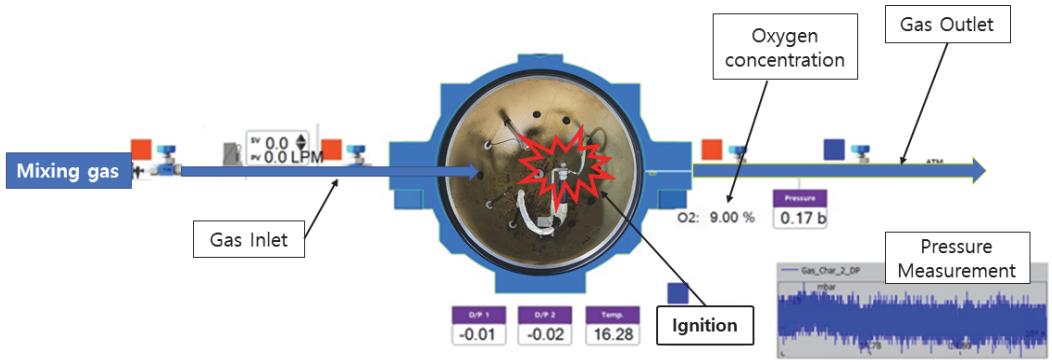

Fig. 4. Configuration of maximum explosion pressure test.

100 vol.%로 설정하고, 이를 기반으로 비례식을 적용하여 혼합가스의 부피 분율을 계산하였다. 예를 들어, 시험기 내 산소 농도가 2.1%로 측정될 경우 산소가 10 vol.%, 혼합가스가 90 vol.%를 차지하는 것으로 산출할 수 있다. 이러한 방법을 통해 가연성 혼합가스의 부피 분율을 조정하여 폭발범위를 구성하였으며, 본 시험에서는 혼합가스 농도 변화에 따른 폭발압력 특성을 확인하기 위해 시험기 내 산소 농도를 16.25%에서 14.00%까지 0.25% 간격으로 감소시키며 시험을 수행하였다.

3.2 시험 결과

식 (1)을 적용하여 계산된 혼합가스의 폭발 하한(LFL) 및 상한(UFL)은 각각 9.7 vol.% 및 58.1 vol.%로 계산되었으며, 일산화탄소의 폭발 하한과 폭발 상한 값과 유사한

Table 8. Summary of test results: maximum explosion test.

Oxygen concentration (%)	Oxygen volume fraction (vol.%)	Mixed gas volume fraction (vol.%)	Pressure (kPa)
16.25	77.38	22.62	2,394
16.00	76.19	23.81	2,498
15.75	75.00	25.00	2,528
15.50	73.81	26.19	2,579
15.25	72.62	27.38	2,641
15.00	71.43	28.57	2,678
14.75	70.24	29.76	2,739
14.50	69.05	30.95	2,432
14.25	67.86	32.14	2,376
14.00	66.67	33.33	2,159

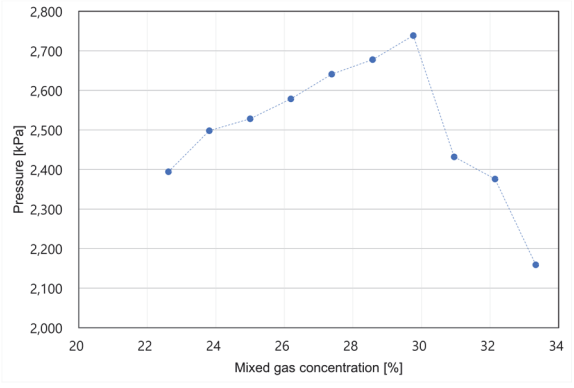

Fig. 5. Explosion pressure according to mixed gas volume fraction.

경향을 확인하였다. 이는 일산화탄소가 90 vol.%의 부피 분율을 차지하고 있는 것으로 판단된다. 초기 시험은 시험기 내 산소 농도 16.00% (76.19 vol.%)를 기준으로 수행한 결과, 폭발압력은 2,498 kPa이었으며, 산소 농도를 0.25% 간격으로 증가 및 감소시켜 시험한 결과, 각각 2,394 kPa와 2,528 kPa의 폭발압력이 측정되었다.

이는 시험기 내 산소 농도가 감소할수록 즉, 산소의 부피 분율이 감소할수록 폭발압력이 증가하는 경향을 나타낸다. 이러한 결과를 바탕으로, 시험기 내 산소 농도를 0.25% 간격으로 점진적으로 감소시키며 시험을 수행하였다. 시험 결과, 혼합가스 부피 분율 29.76 vol.% 일 때 폭발압력이 최대치인 2,739 kPa로 측정되었다. 폭발압력과 혼합가스 및 산소의 부피 분율에 대한 상세한 시험 결과는 표 8에 정리하였다.

그림 5는 혼합가스 분비 분율 변화에 따른 폭발압력과의 관계를 보여준다. 혼합가스 부피 분율이 22.62 ~ 29.76 vol.%까지 증가함에 따라 폭발압력이 점진적으로 상승하는 경향을 보이며, 29.76 vol.%에서 최대 폭발압력이 측정된 이후 급격히 감소되는 경향을 보였다. 이를 통해 리튬이온 배터리의 열 폭주로 인한 오프가스 발생 시 2차 폭발의 위험성을 시험적으로 규명하였으며, 혼합가스의 부피 분율 변화에 따른 최대 폭발압력을 측정함으로써 위험도를 정량화 할 수 있다는 것을 보여준다.

4. 결 론

본 연구에서는 전기자동차 배터리의 가장 작은 구성요소인 셀 단위의 화재·폭발 시험을 수행하여, 폭발 과정에서 분출되는 오프가스를 가스크로마토그래피를 통해 정성·정량적으로 분석하였다. 가스 분석 결과, 총 8종의 가연성 가스 성분을 확인하였으며, 이 중 메탄과 일산화탄소가 주요 성분으로 확인되었고 나머지 가스들은 모두 0.15 vol.% 미만의 낮은 부피 분율로 검출되었다.

이에 따라 폭발성 가스에 대해 혼합비를 조절하며 폭발범위를 실험적으로 도출하기 위하여 폭발압력 시험에서는 메탄과 일산화탄소를 기준으로 혼합가스를 제조하였다. 제조된 혼합가스의 부피 분율 변화에 따른 최대 폭발압력 시험 결과, 혼합가스 부피 분율이 29.76 vol.%일 때 최대 폭발압력이 2,739 kPa로 측정되었으며, 이 부피 분율을 초과할 경우 폭발압력은 급격히 감소하는 경향을 보였다. 이러한 결과를 통해 열 폭주 상황에서 발생하는 오프가스가 실제로 2차 폭발을 유발할 수 있는 폭발성을 내포하고 있음을 시험적으로 입증하였다.

또한, 혼합가스의 부피 분율 변화에 따른 폭발압력 특성은 2차 폭발 위험도를 정량적으로 평가하고 설계 안전계수 설정에 활용될 수 있는 중요한 기초자료로 판단된다.

향후 해당 자료를 기반하여 자동차 운반선의 설계 안전계수 설정에 활용할 방법에 대해 연구하고자 한다.

ORCID

In-Chul Park https://orcid.org/0009-0001-5126-4239

감사의 글

본 연구는 소방청(NFA) 과 한국산업기술 기획평가원(KEIT)의 지원을 받아 수행되었습니다(과제명: 전기차 해상운송 중 화재예방을 위한 SOC 기준 설정 및 가이드라인 개발/과제번호: RS-2024-00407897).

REFERENCES

[1] C. Zhang, H. Sun, Y. Zhang, G. Li, S. Li, J. Chang, and G. Shi, *Sustainability*, **15**, 14198 (2023). doi: https://doi.org/10.3390/su151914198

[2] J. W. Cho, Y. W. Choi, W. S. Chae, T. W. Son, and K. S. Kim, *J. Fish. Mar. Sci. Edu.*, **35**, 1010 (2023). doi: https://doi.org/10.13000/JFMSE.2023.12.35.6.1010

[3] United European Car Carriers (UECC), *Electric Vehicle Guideline*, Oslo, Norway (2021).

[4] European Maritime Safety Agency (EMSA), *Guidance on the Carriage of Alternative Fuel Vehicles in Ro-Ro Spaces*, Tech. Rep. v1.2, European Maritime Safety Agency (EMSA), Brussels, Belgium (2025).

[5] Advanced Rechargeable & Lithium Batteries Association, *Technical Guidance for the Application of the 30% State of Charge Limitation*, Brussels, Belgium (2020).

[6] D. Keslar, *A Study of the State of the Charge of Lithium-Ion Batteries in Transportation*, FAA Technical Center, Atlantic City, NJ, USA (2023).

[7] International Air Transport Association (IATA), *Guidance Document for Lithium Batteries and Sodium Ion Batteries*, Montréal, Canada (2025).

[8] R. Yin, M. Du, F. Shi, Z. Cao, W. Wu, H. Shi, and Q. Zheng, *Process Saf. Environ. Prot.*, **181**, 266 (2024). doi: https://doi.org/10.1016/j.psep.2023.11.015

[9] L. Kong, Y. Luo, S. Fang, T. Niu, G. Chen, L. Yang, and R. Liao, *Green Energy Intell. Transp.*, **4**, 100192 (2025). doi: https://doi.org/10.1016/j.geits.2024.100192

[10] Underwriters Laboratory, *UL 9540A: Standard for Safety of Energy Storage Systems and Equipment* (2021).

[11] Korea Battery Industry Association (KBIA), *SPS-C KBIA-10104-05-7488, Test Method for Inducing Thermal Runaway of Lithium-Ion Battery Cells for ESS*, Seoul, Korea (2022).

[12] International Electrotechnical Commission (IEC), *IEC 60079-20-1: Material Characteristics for Gas and Vapour Classification*, Geneva, Switzerland (2010).

[13] M. Qiu, J. Liu, B. Cong, and Y. Cui, *Batteries*, **9**, 411 (2023). doi: https://doi.org/10.3390/batteries9080411