[Research Paper]

리튬이온배터리화재 대응방안의 실효성 분석을 위한 실규모 화재진압실험

임옥근 · 강성욱* · 권민재**,* · 최정윤****†

동아대학교 경찰 · 소방학과 교수, *한국건설생활환경시험연구원 화재센터 책임연구원,

한국건설생활환경시험연구원 화재센터 주임연구원, *동국대학교 화학과 박사과정,

****한국건설생활환경시험연구원 화재센터 센터장

Full-scale Fire Suppression Tests to Analyze the Effectiveness of Existing Lithium-ion Battery Fire Response Procedures for Electric Vehicle Fires

Ohk Kun Lim · Sungwook Kang* · Minjae Kwon**,* · Joung Yoon Choi****†

Assistant professor, Dept. of Police and Fire Administration, Dong-A Univ.,

*Senior Research Engineer, Fire Testing & Research Centre, Korea Conformity Laboratories,

**Junior Research Engineer, Fire Testing & Research Centre, Korea Conformity Laboratories,

***Ph.D Candidate, Department of Chemistry, Dongguk University-Seoul,

****Principal Research Engineer, Fire Testing & Research Centre, Korea Conformity Laboratories

(Received October 15, 2021; Revised October 31, 2021; Accepted November 3, 2021)

요 약

친환경자동차의 누적등록대수가 100만대를 넘어섰으며 그 비중이 증가하고 있다. 본 연구에서는 친환경자동차에 사용되고 있는 리튬이온배터리의 화재 시 실질적인 대응방안인 수계소화제를 이용한 주수, 질식소화덮개, 그리고 간이수조의 실효성에 대해 정량적으로 분석하였다. 물, 침윤소화약제, 포소화약제를 사용하여 리튬이온배터리팩 하부에서 주수한 경우 $0.08\sim0.09\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ 의 온도감소율을 보여 소화제별 유의미한 차이는 보이지 않았다. 질식소화덮개를 적용한 경우에도 지속적인 열폭주의 발생이 관찰되었으며, 간이수조 사용 시에는 손상된 배터리팩 하우징의 틈새로 물이 유입되어 직접 냉각이 이루어진 후에 배터리의 온도가 급격히 감소함을 관찰했다. 이런 정량적 분석결과는 전기차화재 대응전략 및 전술을 마련하는데 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

ABSTRACT

The number of registered eco-friendly vehicles has exceeded a million, and their market share has expanded. In this study, the effectiveness of existing fire response procedures for lithium-ion batteries, which are widely used in eco-friendly vehicles, was investigated by using water-based extinguishing agents, fire blankets, and flood barriers. Water, wetting agents, and foaming agents were sprayed on the underside of battery packs. A temperature decrease rate of $\sim0.08\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ was measured, and no significant difference was observed between the extinguishing agents. Continuous thermal runaway occurred when a fire blanket was applied, and the temperature inside the damaged battery pack rapidly decreased after water permeated its cracks. Quantitative analysis of fire suppression methods can provide information toward the development of practical fire incident response plans for electric vehicles.

Keywords : Electric vehicle, Lithium-ion battery fire, Fire suppression, Fire blanket, Water container

† Corresponding Author, TEL: +82-43-210-8991, FAX: +82-43-210-8985, E-Mail: j.yoon.choi@kcl.re.kr

© 2021 Korean Institute of Fire Science & Engineering. All right reserved.

1. 서 론

국토교통부에 따르면 2021년 7월 기준으로 하이브리드차, 배터리전기차(이하 전기차), 수소연료전지전기차(이하 수소차) 등 등록된 친환경 자동차가 100만대를 넘었으며 그 중 전기차는 18만대로 약 18%를 차지한다⁽¹⁾. 2019년 기준으로 등록된 전기차는 총 89,918대이며 그 해에 발생한 전기차 화재는 총 16건이었다. 이에 소방청에서는 전기차 사고대응 매뉴얼을 개발하였으며, 하이브리드 자동차 사고대응절차를 차량화재 사고대응절차로 현장표준작전절차를 개선하는 등⁽²⁾ 최근 정부의 친환경정책에 따라 전기차의 등록대수가 증가함에 따라 이에 따른 화재사고에 적절히 대응하기 위해 다각적인 노력을 기하고 있다.

전기차 화재사고에서는 일차적으로 소화가 이루어진 이후에도 리튬이온배터리(이하 LIB)의 재발화가 발생할 가능성이 매우 높은 것으로 알려져 있으며, 이에 소비되는 물의 양이 최소 10,000 L 이상이고 소화시간도 약 60 min 이상 소요되는 것으로 보고되고 있다⁽³⁾. 일반적으로 10 min 이내에 진화가 가능한 내연기관 자동차 화재와 비교했을 때, 전기차 화재의 대응에는 상당한 소방력의 동원이 요구됨을 예측할 수 있으며, 특히 고속도로와 같이 인근에 소화전이 없는 상황에서는 소화용수의 보급에 부담이 생기므로 소방대원의 적극적인 대응이 어려울 수 있다. ‘재난현장 표준작

전절차 수립운영에 관한 규정’에 의거한 ‘차량화재 대응절차’에 따르면, 하이브리드자동차 혹은 전기차 화재대응 시 발화기 소화활동에서는 ABC분말 소화약제를 사용하고 성장기와 최성기에는 감전에 주의하면서 주수 소화할 것을 제안하고 있다. 그러나 현 절차에는 전기차 화재의 특성을 고려한 대응방법이 충분히 반영되어 있지 못한 상황이다. 또한 소방대원들이 전기차 화재의 특성을 고려한 대응전략 및 전술을 마련하는데 기반이 될 수 있는 연구데이터가 충분치 않은 실정이며, 소방력을 최적으로 사용할 수 있는 효과적인 대응방안에 대한 연구도 지속적으로 필요한 상황이다.

최근 발표된 서울소방재난본부의 ‘친환경 자동차 사고대응 가이드라인’ 교육 영상에서는 전기차 화재의 특성을 반영하여 화재진압 시 Figure 1(a)에서와 같이 차량 하부에서 특수 제작된 스프링클러 관창을 사용하여 주수하도록 안내하고 있으며, 차량 하부를 직접적으로 주수할 수 없는 경우에는 차량의 한쪽 면을 비스듬히 들어 올린 후에 기존 관창을 사용하여 하부를 주수하는 전략을 제안하고 있다⁽⁴⁾. 이는 Figure 1(b)에서처럼 전기차의 LIB팩이 승객석 하부의 차량 프레임 하단에 볼팅되어 있기 때문에 열폭주가 발생한 경우 LIB팩에 직접적으로 주수가 가능한 부위가 차량 하부이기 때문이다. 또한 몇몇 소방서에서는 Figure 1(c)에서처럼 내연기관 자동차 화재에 소화효과가 있는 것으로 보고되고⁽⁵⁾ 있는 질식소화덮개를 전기차 화재 현장에 적용

(a) Fire suppression tactic⁽⁴⁾

(b) The location of lithium-ion battery pack in an electric vehicle (i.e. Volkswagen ID.3)

(c) Fire blanket (Sejong fire department)

(d) Water container (Hwasung fire station)

Figure 1. Responses to electric vehicle fires.

해보기 위한 실험을 수행하기도 하였으며, LIB 재발화에 대비하기 위한 목적으로 Figure 1(d)에서 보이는 것처럼 수조에 물을 채워 사고차량을 침수시켜 보기도 하였다.

이에 더하여, 전기차 화재에 사용되는 소화제에 대한 다양한 연구들이 수행되어 왔다. 이들 중 Xu 등⁽⁶⁾은 94 Ah 용량의 LIB셀을 열폭주 시킨 뒤 3종류의 소화제, 즉 이산화탄소, HFC-227ea, 미분무를 분사하여 온도변화를 실험적으로 분석하였다. LIB 셀에 직접적으로 세 가지 약제를 분사했을 때의 모두 냉각효과를 보이긴 했지만 가장 좋은 효과를 보인 것은 미분무로서 열폭주로 인해 발생하는 열보다 냉각시키는 열의 비율이 더 높은 것으로 보고되었다. 또한 Yuan 등⁽⁷⁾은 LIB 화재에 사용할 수 있는 소화제들에 대해 조사했다. 가스계 소화제인 이산화탄소나 HFC-227ea를 사용한 경우, 일시적으로 온도가 감소했으나 재발화가 발생했으며, 분말소화제의 경우에는 온도도 떨어지지 않았고 재발화까지 발생했다. 미분무, 강화액, 포소화약제 등의 수계 소화제를 사용한 경우, 열폭주된 배터리의 온도가 감소했고 재발화도 일어나지 않았으며, 상기 언급한 약제들 중 가장 효과적이라고 언급하였다.

본 연구에서는 앞서 살펴본 현실적인 대응방법들의 실효성을 정량적으로 분석해보고자 한다. 이를 위해 LIB팩 내부의 셀 하나가 손상되어 열폭주로 확산되는 시나리오를 설정하여 실제 규모의 전기자동차 실험조건을 구현하였고, 여러 대응방법들 중 (1)수계 소화제, (2)질식소화덮개, 그리고 (3)간이수조를 적용했을 경우 실험체의 온도, 소화시간, 약제 투입량 등의 물리량 변화를 분석하고자 한다. 이를 통해 전기자동차 대응전략 및 전술 마련의 기초 데이터로서의 활용되는데 일조하고자 한다.

2. 실험 방법

2.1 전기자동차용 LIB팩의 하우징 특성

배터리전기차는 배터리에 저장된 전기를 에너지원으로 하여 전기모터를 동력원으로 사용하는 친환경 자동차의 일종이다. 전기모터로 차량을 원활히 구동하기 위해서는 200 V 이상의 고전압이 필요하므로 다량의 LIB셀들을 직렬로 연결시켜 고전압을 공급하게 되며, 제한적인 차량 공간들 중 승객석 하부에 공간을 마련하고 다량의 LIB셀들이 집적된 금속하우징(i.e. LIB팩)을 Figures 2(a), 2(b)와 같이 차체 프레임에 볼팅시켜 고정하고 있다. LIB팩의 금속합금 하우징 내부에는 Figure 2(c)에서 보이는 것처럼 다량의 LIB셀, 냉각시스템, 그리고 battery management system (BMS) 등의 전자기들이 배치되어 있으며, 하우징의 상부와 하부 사이에는 고무재질의 실링 스트립이 삽입되어 외부로부터의 수분, 이물질 등의 침투를 방지한다. 특히, 자동차용 LIB팩은 침수조건에서의 안전성을 확인하기 위해 ‘자동차 및 자동차부품의 성능과 기준’ 시행체제의 구동축전지 안정성시험 방법⁽⁸⁾에 따라 95% 이상 충전한 뒤 염수수조에 1 h 동

(a) Before unbolting the LIB pack

(b) After unbolting the LIB pack

(c) The structure of a LIB pack

Figure 2. The structure of an electric vehicle.

안 완전 침수시키는 시험을 하도록 되어 있어, 일반적인 조건에서는 LIB팩 내부로 물이나 기타 소화약제 등을 침투시키기 어려운 구조를 가지고 있다. 참고로, LIB셀의 정의는 비교적 명확하나 여러 셀의 집합체인 LIB모듈의 정의는 사용자별로 상이한 면이 있다. 본 연구에서는 Figure 2(c)에

Table 1. Specifications of the Lithium-Ion Battery Specimen used in the Experiment

Nominal capacity per cell (Ah)	Nominal voltage per cell (V)	Nominal energy per cell (Wh)	Weight per cell (g)	The number of cells per module (ea)	The number of modules per pack (ea)
60	3.63	218	887.8	30	6

표시된 것처럼 LIB셀이 30개 정도 모여 독립적으로 한 덩어리를 이루는 집합체를 LIB모듈이라고 정의한다. 실험에 사용된 LIB팩의 제원은 Table 1에 정리되어 있으며, state of charge (SOC)는 95%로 충전하였다.

2.2 실험 방법

본 연구에서는 전기차 화재에 대응하기 위한 다양한 방법들을 정량적으로 검토하기 위해 3가지 대응전략에 대해 평가했다. 첫 번째는 전기차 하부에 설치된 LIB팩 내부에서 열폭주가 발생한 경우 ‘친환경 자동차 사고대응 가이드라인’에 따른 수계소화제의 유효성을 검토했고, 다음으로는 내연기관자동차 화재에 적응성이 있다고 알려진 질식소화덮개의 실효성에 대해 분석했다. 마지막으로 간이스주의 사용가능성에 대해 조사했다.

차량화재 발생 시 현장대응요원이 현재 보유 장비들과 함께 소화활동에 용이하게 활용할 수 있는 소화제는 일반 소화용수 혹은 일반 소화용수에 원액만 소량 첨가하면 되는 소화약제류(침윤소화약제, 포소화약제 등)라고 할 수 있다. LIB팩 내부에서 배터리 열폭주가 발생했을 때 이러한 수계소화약제들의 유효성을 비교하기 위해 전기차로부터 탈거된 LIB팩의 중앙부에 있는 1개의 LIB모듈에 Figure 3(a)와 같이 점화용 발열패드와 열전대가 설치된 실험체를 3개 제작했다. 발열패드는 65 × 90 mm의 크기로 LIB모듈의 가장 중앙에 위치한 직사각형 파우치 형태의 LIB셀 한 면의 표면에 밀착하여 부착하였고, 실험 시 열폭주를 일으키기 위해 균일한 전류 흐름을 유도하였다. 발화용 LIB셀의 반대면(TC-C series), LIB모듈의 끝 단(TC-F series), 그리고 LIB팩 금속하우징 표면에 열전대를 부착하여 온도 변화를 관찰하고자 하였다. Figure 2(a)에서와 같이 전기차는 LIB팩이 차체 프레임 하부에 볼트로 체결하여 고정되어 있으므로, 화재 진압 시 일반적으로 Figure 1(a)에서처럼 차량 하부에 고정된 LIB팩의 노출면에 직접적으로 주수한다. 이와 같은 대응방법의 실효성을 검토하기 위해, LIB팩 하부노출면에 3종의 소화제를 분무주수 할 수 있도록 Figure 3(b)와 같이 하부에서 상부로 관찰방향을 조정하여 기구물을 마련하였다. 또한, 실제 화재사고 상황에서는 열용량이 매우 큰 전기차 차체(내장재 포함)가 LIB팩 상단에 위치하게 되므로, 이를 고려하여 LIB팩의 상부표면을 단열재로 덮어 열손실을 최소화한 최악의 조건을 만들었다. 실제 사고대응 시와 유사한 조건에서 소화제를 주수하기 위해 충북소방본부 119특수구조단과 강원소방본부 삼척소방서의 지원을 받아 화학소방차 및 물탱크차에 관찰 호스를 연결하였고,

(a) Positions of thermocouples and a heating pad in the LIB pack for the fire suppression tests

(b) Specimen setup (for the foam agent test)

(c) Flow rate

Figure 3. Test setup (Test #1).

말단에 유량계를 설치하여 유속과 주수량을 조절 및 계측하였다. 전기차에 사용되는 배터리는 LIB팩 하우징 내부에 밀봉되어 있기 때문에 LIB팩 하부노출면을 지속적으로 주수할 수 있도록 Figure 3(c)에서 보이는 것처럼 3번의 실험 모두에서 약 70 LPM으로 설정하였다. 부착해 놓은 발열패드와 전압을 인가하고 인근에 설치한 열전대의 온도변화를 확인하여 LIB셀의 열폭주를 확인 한 후 주수를 시작하여 LIB팩 내부의 온도변화를 관찰했다.

일반차량화재의 초기 소화와 사고차량 주변으로의 피해 확산을 지연하기 위한 목적으로, 최근 여러 소방서에서 질식소화덮개의 도입을 고려하고 있고 전기차 화재진압에 적용해보고자 하는 시도도 이루어지고 있다. 배터리 열폭주로 인한 전기차 화재에서 이런 질식소화덮개의 유효성을 정량적으로 분석하기 위해 전기차에서 LIB팩을 탈거하여, 수계소화제의 유효성을 분석하기 위한 실험에서와 동일하게 LIB팩 내부의 한 위치에 점화용 발열패드와 열전대를 Figure 4(a)에서와 같이 설치했다. 이렇게 발열패드와 열전대를 설치한 LIB팩을 전기차의 하부에 볼트를 사용하여 일반 사용조건과 동일하게 체결했다. 이렇게 준비된 실험체는 간이수조의 실효성을 검토한 실험에까지 사용되었다. 발열패드를 가열하여 LIB팩에 열적 손상을 주어 열폭주를 발생시켰고, 이로 인해 배출된 가연성 가스가 혼합기를 형성하여 뒷바퀴 인근에서 화염을 발생했다. 화염이 관찰된 후 2 min이 경과한 시점에 질식소화덮개를 덮어 60 min 간 LIB팩 내부의 온도변화를 관찰했다. 이후 질식소화덮개를 제거했을 때 공기의 유입으로 인해 화염을 동반한 추가적인 연소가 발생했고, 이렇게 자체 및 내장재에 발생된 화염은 숙련된 현장대응요원들에 의해 Figure 4(b)에서처럼 일반적인 주수방법으로 소화하였다. 1차 소화 이후, LIB셀들의 재발화를 방지하기 위한 목적으로 Figure 4(c)에서처럼 실험체 주변으로 모듈러 간이수조를 설치하여 실험체를 침수시켰다. 이러한 일련의 과정 중에 실험체에 설치된 열전대를 이용하여 온도변화를 관찰하였다.

3. 실험 결과

3.1 소화약제

첫 번째 실험에서는 열폭주로 인해 LIB팩 내부의 온도가 936 °C까지 상승했고, LIB모듈 양 끝단의 셀들 모두에서 열폭주가 관찰된 약 19 min 시점에 LIB팩 하부노출의 일반소화용수 주수를 시작하였다. 주수가 시작된 후 Figure 5(a)에서 보이는 것처럼 LIB팩의 내부 온도가 감소하긴 하였으나, LIB팩을 견고하게 보호하고 있는 금속하우징으로 인해 약 70 min 간 약 5,064 L의 소화용수를 주수했음에도 불구하고 LIB모듈 내부의 온도를 상온 근처까지 냉각시키는데 어려움이 있었다. 해당 실험체와 비슷한 크기의 내연기관차 화재의 경우, 일반적으로 10여 min 이내에, 일반 소방펌프차 1대가 싣고 다니는 3,000 L 정도의 소화용수로, 진압

(a) Positions of thermocouples and a heating pad in the LIB pack for the fire blanket tests

(b) Fire suppression

(c) Vehicle submersion

Figure 4. Test setup (Test #2-3).

이 가능하다고 알려져 있다. 이와 비교해봤을 때, 전기차는 상대적으로 많은 소화용수와 오랜 소화시간이 걸림을 정량적으로 확인할 수 있었다.

다음으로 일반 소화용수에 소량의 침윤액 첨가제를 섞은 소화약제를 사용하여 실험을 수행하였다. 점화용 발열패드와 전압을 인가하고 약 7 min 후에 열폭주로 인해 약 900 °C까지의 급격한 온도 상승이 Figure 5(b)에서와 같이 관찰되었다. 실험 시작 약 18 min 후에 침윤소화약제를 주수했고, 이후 39 min 동안 약 3,013 L의 소화제가 사용되었

Figure 5. Temperature-time relationships depending on fire-extinguishing agent.

다. 이를 통해 LIB팩 중심부의 온도가 577 °C까지 감소했고 인근의 온도도 289 °C까지 감소하였다.

마지막 실험에서도 동일한 방법으로 LIB팩 내부에 열폭

주를 발생시켰다. 첫 번째 열폭주는 Figure 5(c)에서 보이는 것과 같이 약 5 min 후에 관찰되었고 중심부의 온도는 925 °C까지 상승하였다. 실험 시작 18 min 후에 포소화약제 주수를 시작하여 약 36 min 동안 약 2,668 L의 소화약제를 사용한 후 LIB팩 내 중심부와 인근 온도는 각각 613 °C와 355 °C까지 서서히 감소하였다.

LIB팩 내부의 LIB셀에 열폭주를 유발시킨 후, 금속하우징 하부노출면에 수계소화제인 물, 침윤소화약제, 그리고 포소화약제를 각각 주수하고 LIB팩 내부의 온도 변화를 관찰하였다. Table 2에서와 같이, LIB팩 내부 중심부의 온도 감소율은 소화제의 종류와 상관없이 0.08-0.09 °C/s로 조사되었다. 또한, 동일한 양인 2,668 L의 물, 침윤소화약제, 포소화약제를 주수한 시점에서 LIB팩 내 중심부의 온도는 각각 563.2 °C, 590.5 °C, 613.5 °C로 측정되었고 인근의 온도는 각각 293.5 °C, 311.7 °C, 390.4 °C로 조사되었다. 결과적으로, 약 3,000-5,000 L 이상의 소화제를 사용하여 40여 min 이상 주수하였으나 온도 감소가 크지 않았으며, 수계소화제 별로도 유의미한 차이는 관찰되지 않았다.

3.2 질식소화덮개

자동차 하부에 볼트로 체결하여 장착된 LIB팩 내부에 설치된 발열패드에 전압을 인가한 뒤 약 8 min 후에 내부에 있는 배터리의 열폭주가 발생하였다. 열폭주로 인해 LIB팩 내부의 온도가 상승하고 이로 인해 플라스틱 재질로 된 안전밸브가 파손되어 이 틈으로 가연성 가스가 방출되었다. 방출된 가연성 가스는 LIB팩 상단의 위치한 자동차 뒷좌석과 일체로 제작된 금속 프레임에 막혀 차량의 뒷바퀴 인근으로 우회해서 배출되었으며, 이 부위부터 화염이 관찰되었다. 선행 연구들을 통해 질식소화덮개는 전기차 화재가 성장기 이후 단계에 도달하면 효용성이 떨어짐을 파악하였기 때문에, 화염이 발견되고 2 min 후에 Figure 6과 같이 질식소화덮개로 실험체를 덮었다. 덮는 도중, 실험체에서는 간헐적인 폭발음과 함께 화염과 가연가스가 관찰되었고, 완전히 덮은 이후에 화염은 관찰되지 않았으나 덮개와 바닥면 사이 공간을 통해 흰색의 가연성 가스가 지속적으로 새어나오는 현상을 관찰할 수 있었다.

Figure 7은 LIB팩 내부의 온도변화를 보여주며, 음영으로 표시된 부분이 질식소화덮개를 적용한 후 60 min 간의 온도변화를 나타낸다. LIB팩 내부에는 Figure 4(a)에서 보이는 것처럼 LIB모듈들이 차량의 길이 방향으로 3줄로 배

Table 2. Effectiveness of Temperature Reduction regarding Fire-extinguishing Agent

Extinguishing agent	Discharging time [S]	Agent volume [L]	Temperature at starting spray [°C]		Temperature at the end of spray [°C]		Temperature decrease rate [°C/s]	
			Center	Front	Center	Front	Center	Front
Water	4089	5064	785.36	550.92	414.90	164.93	0.09	0.09
Wet	2319	3013	787.07	535.43	577.41	289.49	0.09	0.11
Foam	2154	2668	780.32	614.35	613.67	390.47	0.08	0.10

Figure 6. A fire-blanket-covered instrumented electric vehicle.

Figure 7. Temperature-time relationships applying fire blanket and water container.

치되어 있으며, 그 중 중간열에 배치된 LIB모듈(TC-M2)에서 처음으로 열폭주가 발생하였다. 질식소화덮개를 덮어 산소를 차단하였음에도 불구하고, 실험시작 32 min 후에 중간열에 위치한 다른 LIB모듈(TC-M1)의 온도가 급격히 상승한 것으로 보아 열폭주가 발생한 것을 확인할 수 있었다. 질식소화덮개를 사용한 60 min 동안 온도의 급격한 증가는 관찰되지 않았으나 냉각거동 역시 관찰되지 않았고, 덮개를 걷어낸 후 인근에 있는 LIB셀들의 열폭주가 발생했다. LIB팩의 중간에 있는 LIB모듈의 열폭주로 인해 플라스틱 재질의 안전밸브(LIB disconnect)가 녹아 이 틈으로 가연성 가스가 방출됨에 따라 이와 가까운 쪽에 위치한 오른쪽 LIB모듈이 상대적으로 많은 열에너지를 받아 열폭주가 먼저 발생하고(TC-R series), 이후 왼쪽에 위치한 LIB모듈의 열폭주가 발생한 것으로 판단된다(TC-L series). 결론적으로 전기차화재 진압에 있어 질식소화덮개는 산소의 공급을 방해하여 자동차 내장재 연소를 지연시키는 정도의 효과를 보였으며, 전기차를 직접적으로 소화하는 도구로서는 한계가 있었으나 초기 화재의 성장 혹은 화염의 주변확산을 지연하는 데는 효과가 있음을 정량적으로 확인하였다.

3.3 간이수조

질식소화덮개를 적용하고 있는 동안에도 덮개 하단부로

Figure 8. A electric vehicle submerged in a water container.

흰색의 연기가 간헐적으로 발생했으며, 질식소화덮개를 제거한 순간 내부에 갇혀 있던 연기들이 다량 방출되었다. 질식소화덮개를 제거한 뒤 LIB셀들이 재발화되면서 가연성 가스가 차량의 뒷바퀴 주위로 방출되었고, 가연성 혼합기가 점화되어 자동차 뒷부분과 내장재 일부가 연소되었다. 덮개 제거 후 16 min 경과 후 자동차 내·외장재가 화염에 의해 일부 녹아 바닥으로 떨어져 불뚱을 만들며 화세가 점점 커졌다. 물을 주수하여 욕안으로 관찰되는 화염을 1차적으로 제거하였으나 LIB팩 내부의 온도하강은 미비하여 차량의 뒷바퀴쪽으로 흰색의 연기가 지속적으로 방출되었다. 1차 소화 이후, 실험 차량을 중심으로 Figure 8과 같이 간이수조를 조립하고 관찰을 이용하여 물을 채웠다. 간이수조의 크기는 $5 \times 3 \times 0.5$ m로서 약 7.5 m^3 의 수원이 필요하여 수조를 채우는데 약 40 min 이상의 시간이 소요되었다. Figure 7에서 보이는 것처럼, 실험 시작 후 126 min 경과 후에 LIB팩 내부의 온도가 급격히 감소하였다. 이는 Figure 8에서처럼 간이수조에 채워지던 물이 손상된 LIB팩 하우징의 틈새를 통해 팩 내부로 유입되기 시작하면서 직접적으로 냉각이 되었기 때문으로 유추된다. Ma 등⁽⁹⁾에 따르면 배터리 내부의 온도상승 시 LIB의 분리막은 약 $130^\circ\text{C} \sim 140^\circ\text{C}$ 에서부터 녹기 시작하며 240°C 이상에서 양극재의 열분해가 시작되는 것으로 알려져 있다. 따라서 LIB셀의 열폭주를 차단하기 위해서는 LIB팩 내부에 직접적으로 소화약제를 투입하여 내부의 재료들이 열분해가 발생하지 않도록 온도를 낮춰주는 것이 효과적인 것으로 판단된다.

4. 고 찰

전기차 화재의 진압에 필요한 핵심 소화작용은 냉각이며 냉각이 주 소화메커니즘인 물 혹은 수계소화약제가 이러한 화재에 효과적임은 이미 알려져 있다^(6,7). 서울소방재난본부의 친환경차량 사고대응 가이드라인 교육에서와 같이 전기차 화재 시 실질적으로 LIB를 가장 직접적으로 냉각시킬 수 있는 방법은 자동차 하부에 직접 주수하는 것이다. 이런 실질적인 대응방법에서 쉽게 사용할 수 있는 물, 침윤소화약제, 포소화약제를 적용했을 때 LIB팩 내부의 온도감소효과는 소화제별로 유의미한 차이를 보이지 않았다. 그 이유는 LIB팩이 침수시험을 통과할 정도로 외부로부터 수분이 침투되지 않게 제작되는 점과 LIB팩 하부가 자동차

Figure 9. Vehicle structure at back seat.

운행 중에 발생할 수 있는 충격과 이물질 침투로부터 보호하기 위해 견고한 금속합금 하우징으로 구성되는 점 때문이다. 소화제의 경제성, 용이성, 사용 이후 처리문제 등까지 고려했을 때 아직까지는 물 소화약제를 사용하는 것이 가장 합리적이라고 판단된다.

전기차 화재에서의 질식소화덮개의 실효성은 소화 측면에서는 내연기관차 화재에서만큼 크지 않았다. 초기 단계의 화염을 덮어버림으로서 주변부로 화염이 확산되거나 화염으로부터 복사열이 주변에 전달되는 현상을 제어할 수 있었지만, LIB팩 내부의 냉각은 이루어지지 않아 LIB셀들의 열폭주 가능성이 저감되지 못했다. 따라서 질식소화덮개는 전기차 화재의 초기 단계에서 성장기로의 발전 혹은 주변으로의 화염확산을 지연시키는 용도로 활용하는 것이 효과적일 것이다.

어떠한 방식으로든 LIB 화재를 성공적으로 소화했다고 하더라도 LIB의 온도가 충분히 내려가지 않았다면 항상 LIB의 재발화 가능성을 염두에 두어야 한다. 이런 재발화를 방지하기 위해서는 해당 LIB의 온도를 일정 온도 이하로 냉각시키는 것이 현재까지는 유일한 방법이라고 할 수 있으며, 이러한 관점에서 간이수조는 실효성이 높을 것으로 판단된다. 다만, 수조 내 채워지는 물의 양과 채우는 시간의 최소화 방안, 수조의 조립 및 설치 용이성, 수조 내 최소 침수시간 등의 주제에 대한 추가적인 고민이 필요해 보인다.

전기차의 LIB팩 하우징에는 일반적으로 Figure 9에서 보이는 것과 같은 고전압 배터리 디스커넥터가 있는데, LIB팩 내부에서 열폭주 발생 시 이 부분의 플라스틱이 녹으면서 틈이 생성되어 이 경로를 통해 가연 가스가 집적적으로 배출되곤 한다. 본 연구의 실험체에서는 LIB disconnecter가 뒷좌석 하단부에 위치하여 고온의 배출가스가 뒷좌석 시트의 바로 아래 위치한 차체 금속판에 막혀 양쪽 뒷바퀴 공간으로 우회 방출되는 경향을 보였으며, 에너지조건이 만족할 경우 점화되어 자동차의 뒷바퀴, 뒷좌석, 범퍼 등에서부터 주로 연소가 시작되었다. 가연가스의 배출경로와 관

련하여, 고압수소저장탱크가 설치되는 수소차의 경우 thermally activated pressure relief devices (TPRD)가 설치되어 있어, 어떠한 원인에서든 TPRD 부위의 온도가 상승하여 $110 \pm 5^\circ\text{C}$ 에 도달하면 노즐을 막는 캡슐이 녹으면서 자동적으로 밸브를 개방하여 내부의 수소를 바닥 방향으로 방출하게끔 설계되어 더 큰 폭발사고를 예방하고 있다. 이러한 개념을 도입하여, 전기차에서도 LIB팩 내부가 일정 온도에 도달하게 되면 LIB셀의 열폭주로 발생하는 가연가스의 배출을 일정한 방향으로 유도할 수 있게 설계함으로써 외부에서 사고발생을 쉽게 인지하게 하고 배출된 가연가스가 차량의 다른 가연물과의 접촉을 최대한 피하도록 유도하는 방안도 고민해 볼 필요가 있다. 반대로, 배출되는 가연가스의 경로를 다양화하여 배출 집적도를 낮추는 설계를 통해 연소하한계(lower flammability limit)에 도달하지 못하도록 유도하여 발화 가능성을 낮추는 방안도 검토해볼 수 있겠다. 마지막으로, 간이수조 실험에서 LIB팩 내에 소화제가 직접적으로 침투했을 때 LIB팩 내부의 온도가 급감함이 관찰되었는데, 이를 고려하여 LIB팩의 내부에 소화제를 직접적으로 주입할 수 있게 하는 설계와 그 때의 실효성에 대해서도 검토해 볼 필요가 있다.

5. 결 론

대표적인 친환경자동차인 전기자동차의 효과적인 소화방법에 대한 정량적 검토를 위해 사고대응요원들이 가장 빠르게 사용할 수 있는 수계소화약제의 소화효과와 질식소화덮개 및 간이수조의 소화적응성에 대해 실험적으로 분석했다. 서울소방재난본부의 친환경차량 사고대응 가이드라인에서 제시하고 있는 방법을 적용하여 자동차 하부에 견고하게 체결되어 있는 LIB팩 하부를 물, 침윤소화약제, 포 소화약제를 이용하여 주수한 결과 열폭주가 발생한 LIB팩 내부의 온도저감효과는 소화약제별로 큰 차이가 없는 것으로 조사되었다. 질식소화덮개를 적용했을 때 자동차 내장재의 연소는 저지할 수 있었지만 LIB셀의 열폭주는 지속적으로 발생함을 확인하였다. 간이수조를 사용하여 열폭주로 인해 파손된 LIB팩 내부에 직접적으로 물이 유입된 후에야 LIB셀의 온도가 급격히 하락한 것을 볼 때 전기차 화재의 효과적인 대응을 위해서는 LIB팩 외부에서 간접적으로 냉각시키는 것보다는 LIB팩 내부에 직접적으로 소화제를 투입할 수 있는 전략이 필요하다. 이런 연구결과는 향후 전기차 화재사고의 효과적인 대응전략을 수립하는데 도움을 줄 것으로 기대된다.

감사의 글

본 실험에 도움을 주신 충북소방본부 119특수구조단, 강원소방본부 삼척소방서, 한국건설생활환경시험연구원 소화재센터 관계자분들께 감사드립니다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 20206810100030).

References

1. Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT), Kona EV recall Press released (2020.10.08.).
2. National Fire Agency, "Developing incident response manual for electric vehicle", Press released (2020.9.21.).
3. JTBC Suljeon live, "More than an hour to electric vehicle fire suppression.....no response manual", <https://www.youtube.com/watch?v=KQypglEXfdI>. accessed 10 Sep 2021. (2021. 6.23.).
4. Seoul Metropolitan Fire & Disaster Headquarters, "Educational video clip of incident response for eco-friendly car", <https://www.youtube.com/watch?v=Ee7bcOeUR-o> accessed 9 Oct 2021. (2021.9.6.).
5. J. Kwon, H. Kim, S. Lee, S. Kim, T. Park, T. Kim and S. Kim, "Application of Car Fire Blankets to Car Fires", *Fire Science and Engineering*, Vol. 35, No. 1, pp. 143-149 (2021). <https://doi.org/10.7731/KIFSE.2513d05f>.
6. J. Xu, P. Guo, Q. Duan, X. Yu, L. Zhang, Y. Liu, and Q. Wang, "Experimental study of the effectiveness of three kinds of extinguishing agents on suppressing lithium-ion battery fires", *Applied Thermal Engineering*, Vol 171, Article 115076, pp. 1-9 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115076>.
7. S Yuan, C. Chang, S. Yan, P. Zhou, X. Qian, M. Yuan and K. Liu, "A review of fire-extinguishing agent on suppressing lithium-ion batteries fire", *Journal of Energy Chemistry*, Vol. 62, pp. 262-280 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.jechem.2021.03.031>.
8. Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT), "Performance and standard regulation of vehicle and vehicle parts", Notice of MOLIT 2020-451 (2020.6.17.).
9. S. Ma, M. Jiang, P. Tao, C. Song, J. Wu, J. Wang, T. Deng and W. Shang, "Temperature effect and thermal impact in lithium-ion batteries: A review", *Progress in Natural Science: Materials International*, Vol. 28, No. 6, pp. 653-666 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2018.11.002>.