



전기자동차 내 리튬이온전지 화재로 발생하는 독성가스의 위험성 분석

오의영 · 민동석 · 한지윤 · †정승호 · 강태선*

아주대학교 환경안전공학과, *세명대학교 보건안전공학과
(2018년 11월 1일 접수, 2019년 2월 19일 수정, 2019년 2월 20일 채택)

Consequence Analysis of Toxic Gases Generated by Fire of Lithium Ion Batteries in Electric Vehicles

Eui-young Oh · Dong Seok Min · Ji Yun Han · †Seungho Jung · Tae-sun Kang*

Dept. of Environmental and safety Engineering, Ajou University

**Dept. of Health and Safety Engineering, Semyung University*

(Received November 1, 2018; Revised February 19, 2019; Accepted February 20, 2019)

요약

휴대용 전자기기의 시장이 성장함에 따라서 Lithium Ion Battery(LIB)의 수요 또한 증가하고 있다. LIB는 다른 2차 전지에 비해 높은 효율성을 보이지만 열 폭주(Thermal runaway)로 인한 폭발/화재의 위험성이 있다. 특히나 대용량 LIB cell을 탑재한 Electric Vehicle(EV)의 경우 화재로 발생하는 대량의 독성 가스로 인한 위험성 또한 존재한다. 따라서 사고 피해를 최소화하기 위한 EV 화재로 발생하는 독성 가스의 위험성 분석이 필요하다. 이 연구에서는 EV의 화재로 발생하는 독성 가스의 유동을 전산유체역학(Computational Fluid Dynamic; CFD)을 이용하여 해석하였다. 문헌 조사 결과와 국내 EV 자료를 기반으로 시나리오를 설정하여 시나리오 발생 경과시간에 따른 독성 가스의 확산을 수치 해석하여 위험성에 대하여 분석하였다. 이 연구는 EV 화재로 인한 독성 가스의 위험성을 분석하여 사고 발생에 의한 인명, 재산피해를 최소화하는데 의의를 가진다.

Abstract - As the market for portable electronic devices expands, the demand for Lithium Ion Battery (LIB) is also increasing. LIB has higher efficiency than other secondary batteries, but there is a risk of explosion / fire due to thermal runaway reaction. Especially, Electric Vehicles (EV) equipped with a large capacity LIB cell also has a danger due to a large amount of toxic gas generated by a fire. Therefore, it is necessary to analyze the risk of toxic gas generated by EV fire to minimize accident damage. In this study, the flow of toxic gas generated by EV fire was numerically analyzed using Computational Fluid Dynamic. Scenarios were established based on literature data and EV data to confirm the effect distance according to time and exposure standard. The purpose of this study is to analyze the risk of toxic gas caused by EV fire and to help minimize the loss of life and property caused by accidents.

Key words : computational fluid dynamic, electric vehicle, lithium ion battery, consequence analysis

I. 서론

정보통신기술의 발달과 더불어 정보 공유가 쉬운 휴대용 전자기기의 수요가 증가하였고 이로 인

하여 재사용이 가능하여 장기간 사용할 수 있는 2차 전지의 수요 또한 증가하고 있다. Lithium Ion Battery (LIB)는 가장 진보된 형태의 2차 전지로 과거에 사용되던 납산(Lead Acid)과 니켈 기반의 전지에 비해 에너지 밀도가 높아 휴대용 전자기기와 가전제품에 널리 사용되고 있다. LIB의 수요가 증가함에 따라서 더욱 높은 효율의 LIB가 개발되었고

†Corresponding author: processsafety@ajou.ac.kr
Copyright © 2019 by The Korean Institute of Gas

이는 Drone이나 Electric Vehicle(EV), Hybrid Electric Vehicle(HEV)과 같은 LIB를 사용하는 제품들의 발전에 크게 기여하였다[1-3].

LIB는 다른 2차 전지에 비해서 에너지 밀도와 기전력이 높고 충·방전이 쉬운 장점이 있지만, 물리적 손상이나 온도 상승, 화학적 결함으로 열 폭주(Thermal runaway)로 인한 폭발/화재의 위험성을 내재하고 있다. Table 1은 LIB 화재사고로 휴대용 전자기기의 사고 사례 이외에도 항공기, HEV, EV 사고 사례도 다수 보고되고 있다[4, 5].

LIB로 발생한 사고는 일반적으로 LIB 화재/폭발에 집중되어 있고 LIB 화재로 발생하는 독성 가스에 대해서 크게 연구되고 있지 않다. LIB 화재로 발생하는 가스는 약 20여종의 독성 가스를 포함하고 있어서 이로 인한 중독 사고의 위험성이 존재한다[6-8]. LIB 화재로 인한 독성 가스의 위험성이 크게 주목받지 않는 이유는 보편화한 전자기기에 사용되는 LIB의 용량은 비교적 소량으로 인체에 유해할 만큼의 독성 가스가 발생하는 경우는 드물기 때문이다. 하지만 LIB의 기술 발전이 진행됨에 따라서 대용량 LIB를 사용하는 사례가 증가하고 있

다. EV와 HEV는 이러한 대용량 LIB를 사용하는 예이다.

최근 상용화 되는 EV의 LIB 용량을 기반으로 계산한 결과 1 kg ~ 40 kg의 불화수소가 발생됨을 확인할 수 있었다. 또한 EV나 HEV는 가스 저장 시설 또는 공정 설비와 달리 인구 밀집 지역에서 사고가 발생할 우려가 있다. 이러한 EV 화재의 독성 위험성 때문에 EV 화재로 발생하는 독성 가스의 유동에 대한 수치적인 해석이 필요하다. 수치 해석 결과는 대피 시간과 안전거리에 대한 자료로 인명 피해를 최소화하는데 사용 가능하다[9].

따라서 이 논문은 EV 화재로 발생하는 독성 가스의 영향 거리를 확인하기 위해 LIB 단일 cell에 대한 독성 실험을 한 선행 연구 결과와 국내에서 판매되고 있는 EV의 LIB 성능으로 화재 시 독성 가스 발생 시나리오를 산정하였다. 이를 기반으로 사고 발생 시 인명 피해가 높을 것으로 예상되는 도심 지역에서 EV 화재로 인한 독성가스 확산을 전산유체역학 (Computational Fluid Dynamic)을 이용하여 시뮬레이션하여 EV 화재로 인한 독성 가스의 위험성에 대해 분석하고자 한다.

Table 1. LIB fire and explosion accident[5]

No.	Date	Accident replay	Fire causes
1	18 July, 2011	EV bus catch fire, Shanghai, China	Caused by overheated LiFePO4 batteries
2	11 April, 2011	EV taxi catch fire, Hangzhou, China	Caused by 16 Ah LiFePO4 battery
3	3 september, 2010	A Boeing B747-400F cargo plane catch fire, Dubai	Caused by overheated lithium batteries
4	26 April, 2011	Acer recalled 2700 laptop batteries, as Dell, Apple, Toshiba, Lenovo and Sony done in 2006	Potential overheating and fire hazards
5	March, 2010	Two iPod Nano music player overheating and catching fire, Japan	Caused by overheated lithium batteries
6	January, 2010	Two EV buses catch fire, Urumqi, China	Caused by overheated LiFePO4 batteries
7	July, 2009	Cargo plane catch fire before fly to USA, Shenzhen, China	Caused by spontaneous combustion of lithium ion batteries
8	21 June, 2008	Laptop catch fire in a conference, fire burning 5min, Japan	Caused by overheated battery
9	June, 2008	Honda HEV catch fire, Japan	Caused by overheated LiFePO4 batteries
10	2006-now	Tens of thousands of mobile phone fires or explosions	Caused by short-circuit, overheating, etc.

II. 방법론

2.1. 독성 가스의 선정

LIB에 사용되는 전해질은 비수용액계의 전해질(Non-aqueous electrolyte)로 ethylene carbonate, diethyl carbonate와 같은 유기 탄산염과 Lithium phosphorus fluoride(LiPF₆)와 같은 리튬염으로 구성되어 있다. LIB 화재로 발생하는 불화수소의 대부분은 리튬염인 LiPF₆에서 발생된다.

LIB cell의 열 폭주가 진행함에 따라 온도가 증가하여 200℃ ~ 240℃에서 LiPF₆에서 PF₅가 분리된다. 분리된 PF₅는 수증기 또는 물에 반응하여 불화수소가 생성된다. LiPF₆의 분해로 불화수소가 발생하는 화학 반응 과정은 다음과 같다[10].



화학 반응의 중간 생성물인 PF₅의 잔여 시간은 매우 짧다. 다른 중간 생성물인 POF₃는 POCl₃의 독성 기준값이 HCl보다 높은 것으로 추론 하였을 때 HF보다 유독성 물질인 것으로 추론되지만 정확한 독성 자료는 존재하지 않는다. 그 외의 LIB 화재로 발생하는 대부분의 독성 가스는 독성 기준값이 불분명하거나 비교적 발생량이 낮다. 따라서 이 연구에서는 불화수소의 확산을 수치 해석하여 LIB 화재에 대한 독성 위험성을 분석하였다.

2.2. 시나리오

LIB의 열 폭주는 보통 물리적 충격이나 화학적 결함, 단락, 과충전, 화재로 시작된다. 열 폭주가 진행됨에 따라 불연속적인 화학반응에 의해 불화수소와 열이 비선형적으로 발생하게 된다. 따라서 이리

한 열 폭주에 의한 불화수소의 비선형적인 발생을 묘사하기 위해서 참고 문헌의 실험을 기반으로 누출량을 선정하였다. Fig. 1은 Larsson 등(2017)의 연구 결과로 water mist 여부에 따른 불화수소 발생을 FTIR(Fourier-transform infrared spectroscopy)로 측정된 그래프이다. 또한 Larsson 등(2017)은 LIB cell의 종류에 따른 불화수소의 발생과 열 발생(Heat Release Rate; HRR)을 확인하기 위해서 7종의 LIB cell에 대한 화재로 발생하는 불화수소를 측정하였다. 이 연구에서는 EV에서 발생하는 불화수소에 대한 기준값을 얻어내기 위해 참고 문헌의 실험 결과 중 EV에 사용되는 LIB와 가장 유사한 B 샘플의 실험 결과를 사용하였다. B 샘플은 128 Wh의 Pouch type의 LIB cell로 평균 174 mg/Wh의 불화수소가 발생 된다. Table 2는 국내 EV 제원을 바탕으로 계산된 EV 종류별 발생하는 불화수소의 발생량이다[9]. 이 연구에서는 보수적인 결과를 확인하기 위해 가장 많은 불화수소가 발생하는 H사의 E 모델에 대하여 시뮬레이션 하였다. 열 폭주의 경과에 따른 불화수소의 확산을 자세히 확인하기 위해 Larsson(2017)의 연구에서 water mist가 사용된 연구결과를 사용하였다.

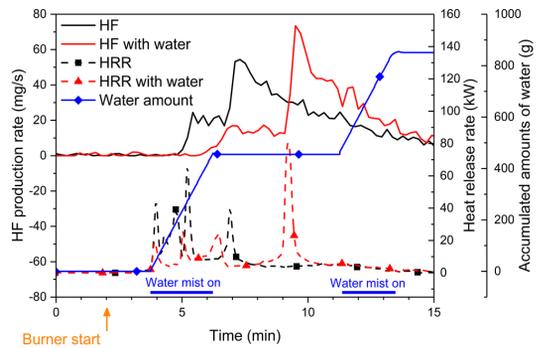


Fig. 1. HF production rate by LIB[9].

Table 2. Mass of HF generated from EV

Company	K		H		S		G	
Model	R	S	I	E	T	S	S	V
Capacity (kWh)	16.0	30.5	28	256	6.1	26.6	21.4	60
Mass of HF (kg)	2.67	5.09	4.68	42.75	1.02	4.44	3.57	10.02

Table 3. Health Effects and Explanations of AEGL Levels in the US EPA

Threshold levels		Effect
	Death	Increasing likelihood of death
AEGL -3	Disabling	-Impairment of ability to escape -Increasing severity of irreversible or other serious long-lasting effects
AEGL -2	Discomfort	-Increase in notable discomfort -Increasing severity of reversible effects(with or without signs/symptoms)
AEGL -1	Detectability	Increasing complaints of objectionable odor, taste, sensory irritation or other mild, non-sensory or asymptomatic effects

2.3. 독성 기준

시물레이션에서 확인할 불화수소의 독성 영향 기준은 AEGL(Acute Exposure Guideline Level) 10분 기준과 IDLH(Immediately Dangerous Life or Health value)를 선택하였다. AEGL은 EPA(Environmental Protection Agency)에서 정한 화학물질 누출이나 재난으로 인한 일반 시민의 노출에 대한 가이드라인이다. Table 3는 AEGL의 수준에 따른 인체에 미치는 영향도이다. IDLH는 미국 NIOSH(National Institute for Occupational Safety and Health)가 제안하는 농도 값으로 30분 이내에 구출되지 않으면 건강상태를 회복할 수 없는 직접 위험 농도를 의미한다[11].

III. 수치해석

이 연구에서는 상용화된 전산유체역학 프로그램인 ANSYS Fluent 18.0을 수치 해석에 사용하였다. ANSYS Fluent는 Navier-Stokes 방정식을 기반으로 하는 지배방정식을 유한 체적법(Finite volume method)를 사용하여 계산한다. 해석에 1,758,565개의 다면체 격자를 사용하였다.

수치해석에 앞서서 Goldfish field test (1991)로 불화수소 누출에 대한 유효성 확인을 하였다. 시물레이션 결과, 누출원에서 300 m거리에서 시물레이션 결과는 실험 대비 52%, 1000 m에서 59%, 3000 m에서 56%의 농도로 field test 대비 50 ~ 60%의 농도로 불화수소가 확산되는 것을 확인하였다[12].

3.1. 지배방정식

이 연구에서는 작동 압력(operating pressure)과 온도로 밀도를 결정하는 Incompressible-ideal-gas 법칙을 사용하여 시물레이션 하였다. 수치해석에

사용된 연속 방정식, 운동량 보존 방정식, 에너지 보존 방정식은 다음과 같다[13].

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \tag{4}$$

$$\frac{\partial (\rho u_i)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u_i \vec{u}) = \nabla \cdot (\mu \nabla u_i) - \frac{\partial p}{\partial x_i} + S_{M \cdot i} \tag{5}$$

$$\frac{\partial (\rho U)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \vec{u}) = \nabla \cdot (k \nabla T) - p \nabla \cdot \vec{u} + S_U \tag{6}$$

ρ 는 밀도, μ 는 점성 계수이고 S_M 는 체적력에 대한 소스 항이다. U 는 내부 에너지로 비압축성 유체의 경우 $U=cT$ (c 는 비열)이다. S_U 는 에너지에 대한 소스 항이다. 난류 모델은 Realizable $k-\epsilon$ 모델을 사용하였다.

3.2. 경계조건

전처리 단계에 사용된 기하 구조(geometry)와 격자(mesh)의 생성은 ANSYS Design modeler 18.0과 ANSYS Mesh 18.0을 사용하였다. 시나리오 발생 장소는 2014년부터 2017년 동안 국내에서 교통사고가 가장 많이 발생하였고 인구밀도가 높아 사고 위험도가 높다고 판단되는 서울시 강남구의 한 지역을 선택하여 시물레이션 하였다.

기상조건은 해당 지역의 10년 기후 평균 중 가장 높은 빈도를 보이는 풍속 4.9 m/s의 동동남풍에 대기안정도 D로 시물레이션 하였다. Fig. 2는 선택한 지역의 지도의 풍향 방향으로 생성한 width(W) × depth(D) × height(H) = 750 × 500 × 250 m³의 공기 유동장이다. Domain의 양단과 풍상 방향은 velocity inlet을 설정하여 풍향은 모두 +x방향으로 설정하였고 난류 운동 에너지와 확산율, 풍속에 UDF

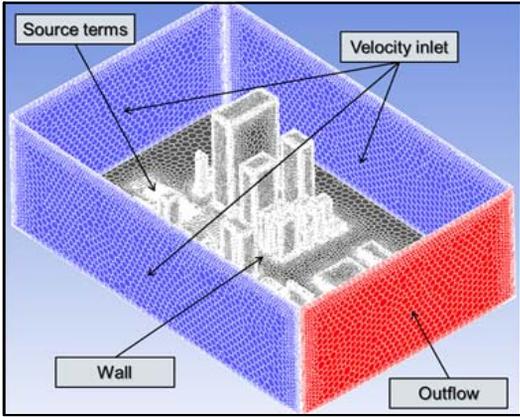


Fig. 2. Boundary condition.

(User Define Function)를 설정하여 연직바람분포 (Wind profile)를 만들었다. 풍하 방향은 outflow, 건물과 지반 부분을 wall로 설정하였다. EV 버스 상단에 설정한 $W \times D \times H = 6 \times 1.5 \times 0.2 \text{ m}^3$ 의 직육면체 domain의 source terms에 열과 불화수소 발생을 설정하였다. LIB의 열 폭주 진행에 따른 독성 위험성을 분석하기 위해 Larsson 등(2017)의 연구결과를 참고하여 EV 버스 화재 경과에 따른 열과 불화수소의 발생을 계산하여 UDF의 형태로 변환하여 source terms에 적용하였다.

IV. 결과

참고 문헌에서 확인된 LIB 화재로 발생하는 불화수소는 30분 이상 지속 발생한다. 하지만 10분 이내에 전체 불화수소의 70% 이상이 발생하므로 10분 노출에 대한 AEGL 기준과 30분 노출에 대한 IDLH 기준에 대하여 모두 시뮬레이션 하였다[14].

Fig. 3는 EV 버스 상단에 설정한 domain의 불화수소의 발생량과 평균 온도이다. 온도의 경우 100초에서부터 크게 상승하기 시작하여 125초에 580 K까지 증가하고 다시 낮아지는 경향을 보인다.

Fig. 4는 domain 내부의 공기 유동 vector이다. 도로 방향으로 공기 유속이 최대 15 m/s까지 상승하고 공기 유동양상의 변화를 확인할 수 있다. -y 방향으로 고층 건물이 밀집되어 있는 domain 중간에는 +y 방향으로 공기가 유동하고 +y 방향으로 건물 밀집도가 높은 domain의 중간 이후는 -y 방향으로 공기가 유동됨을 확인할 수 있다.

Fig. 5는 시나리오 시뮬레이션의 125초 이전에 불화수소의 확산을 독성 기준에 따라 나타낸 그림

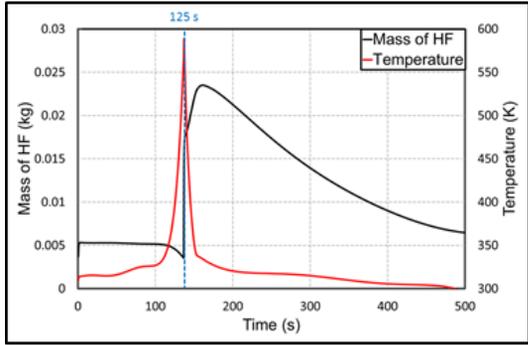


Fig. 3. HF production rate by LIB.

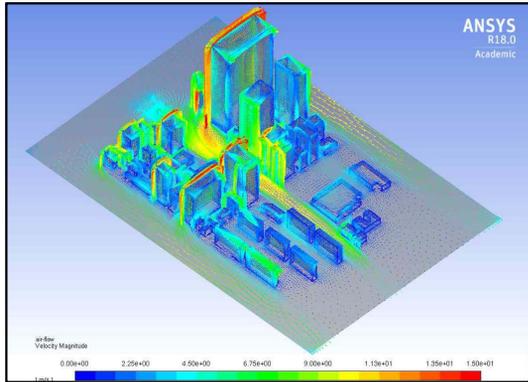


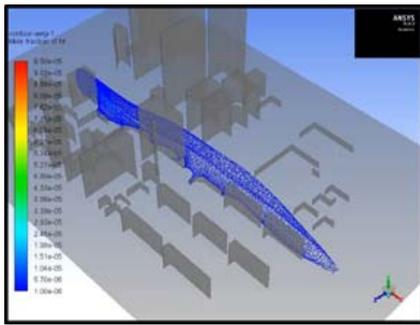
Fig. 4. Air flow vector of simulation zone.

이다. (a)는 독성 기준 AEGL-1의 영향거리로 풍하방향 580 m까지 확산되고, (b)는 독성 기준 AEGL-2의 영향거리로 풍하방향 최대 51 m까지 확산된다. (c)는 독성 기준 AEGL-3의 영향거리로 32 m까지 확산되고, (d)는 독성 기준 IDLH의 영향거리로 87 m이다.

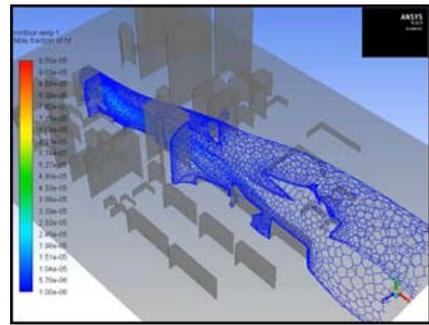
Fig. 6는 시나리오 시뮬레이션의 125초 이후에 불화수소의 확산을 독성 기준에 따라 나타낸 그림이다. (a)는 독성 기준 AEGL-1의 영향거리로 풍하방향 650 m 이상이고, (b)는 독성 기준 AEGL-2의 영향거리로 풍하방향 최대 94 m까지 확산된다. (c)는 독성 기준 AEGL-3의 영향거리로 79 m까지 확산되고, (d)는 독성 기준 IDLH의 영향거리로 182 m이다.

Table 3는 독성 기준과 시뮬레이션 경과시간에 따른 독성 영향거리이다. 독성 기준에 따른 풍하방향 최대 영향거리의 차이는 AEGL-2의 경우는 1.8 배 AEGL-3은 2.5배, IDLH의 경우는 2.2배의 차이를 보인다.

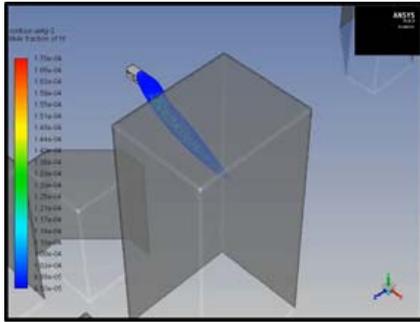
전기자동차 내 리튬이온전지 화재로 발생하는 독성가스의 위험성 분석



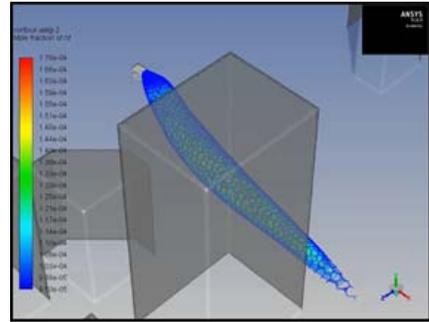
(a) HF dispersion from EV bus (AEGL-1)



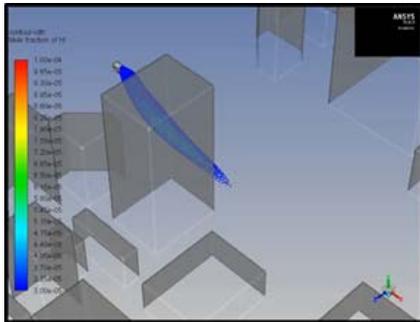
(a) HF dispersion from EV bus (AEGL-1)



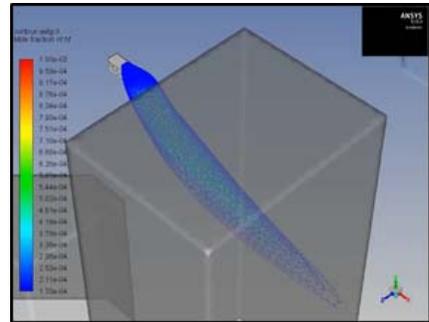
(b) HF dispersion from EV bus (AEGL-2)



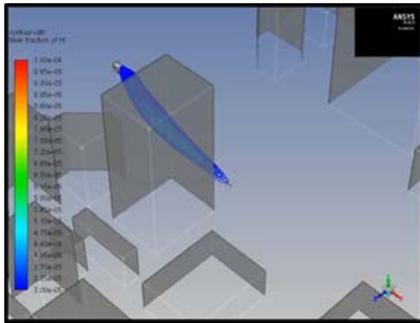
(b) HF dispersion from EV bus (AEGL-2)



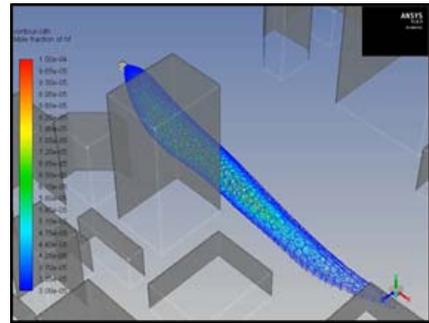
(c) HF dispersion from EV bus (AEGL-3)



(c) HF dispersion from EV bus (AEGL-3)



(d) HF dispersion from EV bus (IDLH)



(d) HF dispersion from EV bus (IDLH)

Fig. 5. HF Dispersion before chemical reaction.

Fig. 6. HF Dispersion after chemical reaction.

Table 4. Toxic distance by fire of EV bus

Toxic level	125 s	Downwind distance
AEGL-1 (1 ppm)	Before	580 m
	After	650 m <
AEGL-2 (50 ppm)	Before	51 m
	After	94 m
AEGL-3 (70 ppm)	Before	32 m
	After	79 m
IDLH (30 ppm)	Before	87 m
	After	182 m

이 시뮬레이션은 EV 버스 화재에 발생 시 불화수소에 대한 시뮬레이션으로 열 폭주 진행에 따른 독성 영향 거리에 대하여 확인하였다. EV의 동력원이 되는 LIB는 자기 반응성 물질로 질식소화가 어렵기 때문에 주수에 의한 냉각소화를 실시해야한다.

하지만 주수로 충분히 냉각 되지 않으면 주수된 물과 전해질의 반응으로 더 많은 불화수소가 생성될 수 있다. 따라서 중독 사고를 방지하기 위해서 화재의 규모에 맞춰서 적절한 양의 주수가 필요하다. 또한 냉각 실패로 대량의 불화수소가 발생 가능성이 존재하므로 이에 대하여 충분한 대피거리를 확보할 필요가 있다.

V. 결론

이 연구는 EV의 화재로 발생하는 독성 가스의 유동을 전산유체역학으로 수치 해석하였다. EV 화재로 발생 하는 독성 가스는 LIB 화재로 발생하는 대표적인 독성가스인 불화수소를 선택하였고 생성 경향은 LIB 화재에 대한 문헌 및 국내 EV 자료를 바탕으로 계산하였다. 이를 바탕으로 도시에서 시나리오 발생 시 불화수소의 확산에 대하여 시뮬레이션 하였으며, 결론은 다음과 같다.

1) 도시 지역에서 시나리오 발생 시 건물 배치와 밀집 정도에 따라서 공기유동양상이 변한다. 따라서 사고 발생 지점의 주변 환경을 고려해야 한다. 특히, 도로는 공기 유동이 활발하여 불화수소의 주 확산 경로이므로 이를 고려하여 대피 경로를 선택해야한다.

2) EV 화재로 발생하는 불화수소의 독성 영향거리는 화재 경과 시간에 따라 변한다. 이는 EV 내부에 있는 LIB의 열 폭주가 원인으로 전해질 내부의 리튬염의 반응이 시작됨에 따라서 대량의 열과 불화수소가 발생하게 된다. 리튬염의 화학 반응에 관여하는 물의 양에 따라 더 많은 양의 불화수소가 생성되기 때문에 화재 진화에 충분한 양을 주수하여야 한다.

3) 화재 경과 시간에 따라서 불화수소의 확산은 반응 여부에 따라 풍하 방향으로 1.8~2.5배까지 증가한다. 따라서 열 폭주로 인한 독성 영향거리의 확산을 고려하여 대피거리를 충분히 확보할 필요가 있다.

감사의 글

이 연구는 한국에너지기술평가원의 에너지 기술 개발 사업(산업현장의 독성가스 누출사고 피해저감을 위한 응급처리 기술 개발)의 지원을 받아 수행되었습니다. (과제번호 : 20162220100260)

REFERENCES

- [1] Tarascon, J. -M., and Armand, M., "Issues and challenges facing rechargeable lithium batteries", *Nature*, **414**, 359-367, (2001)
- [2] Jeong, M. N., "A Study On the Explosion Potential Of Lithium Battery", *Journal of Fire Investigation Society of Korea*, **8(1)**, 53-85, (2017)
- [3] Deng, D., Kim, M. G., Lee, J., Y., and Cho, J., "Green energy storage materials: Nanostructured TiO2 and Sn-based anodes for lithium-ion batteries", *Energy & Environmental Science*, **2**, 818-837, (2009)
- [4] Balakrishnan P., G., Ramesh, R., and Kumar, T., P., "Safety mechanisms in lithium-ion batteries", *Journal of Power Sources*, **155**, 401-414, (2006)
- [5] Wang, Q., Ping, P., Chu, G., Sun, J., and Chen, C., "Thermal runaway caused fire and explosion of lithium ion battery", *Journal of power sources*, **208**, 210-224, (2012)
- [6] Truchot, B., Fouillen, F., and Collet, S., "An experimental evaluation of toxic gas emissions from vehicle fires", *Fire Safety Journal*, **97**, 111 - 118, (2018)
- [7] Lebedeva, N. P., and Brett, L. B., "Considera-

- tions on the Chemical Toxicity of Contemporary Li-Ion Battery Electrolytes and Their Components”, *Journal of The Electrochemical Society*, **163**(6) 821-830, (2016)
- [8] Nedjalkov, A., Meyer, J., Köhring, M., Doering, A., Angelmahr, M., Dahle, S., Sander, A., Fischer, A., and Schade, W., “Toxic Gas Emissions from Damaged Lithium Ion Batteries-Analysis and Safety Enhancement Solution”, *Batteries*, **2**(1), 1-10, (2016)
- [9] Larsson, F., Andersson, P. Blomqvist, P., and Melander, B., -E., “Toxic fluoride gas emissions from lithium-ion battery fires”, *Scientific Reports*, **7**, 1-13, (2017)
- [10] Yang, H., and Shen, X., D., “Dynamic TGA-FTIR studies on the thermal stability of lithium/graphite with electrolyte in lithium-ion cell”, *Journal of Power Sources*, **167**, 515-519, (2007)
- [11] Yun, C., S., “Standard for emergencies (leaks, accidents) of chemical substances”, *Korean Industrial Health Association*, **3**, 22-31, (2016)
- [12] Hanna, S., R., Strimaitis., D., G., and Chang J., C., “Evaluation of fourteen hazardous gas models with ammonia and hydrogen fluoride field data”, *Journal of Hazardous Materials*, **26**, 127-158, (1991)
- [13] Versteeg, G., K., and Malalasekera, W., *An Introduction to computational fluid dynamics : The Finite Volume Method*, 2nd ed, Pearson Education, London, (2007)
- [14] Krewski, D., and Walker, B., *Acute Exposure Guideline Levels for Selected Airborne Chemicals*, Volume 4, The national academies press, Washington D.C., (2004)