

전기자동차와 가솔린자동차의 실물화재 비교 분석

Comparative Analysis of Real Fires for Electric Vehicles and Gasoline Vehicles

최아영* · 이수호** · 박태희*** · 김형식****

Choi, A-Young*, Lee, Soo-Ho**, Park, Tea-Hee***, and Kim, Hyung-Sik****

Abstract

Recently, the demand for electric vehicles has increased rapidly as eco-friendly vehicles to regulate exhaust gas emissions. However, fire accidents related to electric vehicles are also occurring frequently. In the present work, to design a fire suppression plan for electric vehicles, a comparison of electric and gasoline vehicles has been demonstrated through real fire experiments. Temperature measurements have been performed using a heat flux sensor to understand the characteristics of each fire. At the peak of fire, the maximum temperature was measured to be about 1,390 °C or higher. Further, it was confirmed that gasoline vehicles exhibit higher temperature gains than electric vehicles.

Key words : Electric Battery Powered Vehicle, Eco-friendly Car, Gasoline Powered Vehicle, Real Fire, Fire Hazard

요 지

최근 배기가스 배출을 규제하고, 친환경차 도입을 위해 전기자동차 수요가 급격히 증가하고, 전기자동차와 관련된 화재도 빈번하게 발생하고 있다. 본 연구는 이를 대비하기 위한 전기자동차 화재 진압 방안을 도출 하기위해 전기자동차와 가솔린 자동차의 실물 화재 실험을 통해 비교하였고, 각 화재 정상 파악을 위해 열 유속(Heat flux)센서를 이용하여 온도를 측정하였다. 화재 최성기일 때 최고 온도는 약 1,390 °C 이상까지 측정되었고, 가솔린 자동차가 전기자동차보다는 더 높은 온도 특성을 나타내는 것을 확인할 수 있었다.

핵심용어 : 전기자동차, 친환경차, 가솔린 자동차, 실물화재, 화재위험성

1. 서 론

전 세계적인 친환경 정책의 일환으로 내연기관차의 배기가스 배출을 규제하고, 친환경차 도입을 위한 각종 지원 정책을 이어가고 있다. 이러한 이유로 전기자동차 수요가 증가함에 따라 국내 전기자동차 보급량이 급격히 증가하고 있는 추세이다. 2021년 환경부 전기자동차 보급 및 충전인프라

구축현황에 따르면, 국내 전기자동차 168,857대가 최근 3년 사이 보급되었다. 또한, 블룸버그 New Energy Finance (NEF)가 발표한 보고서 ‘2019 전기차 전망(Electric Vehicle Outlook 2019)’에 따르면 2010년 수천 대 판매에 불과했던 전기차가 2018년에는 200만 대 이상 판매됐고, 2025년에는 2,800만대, 2040년에는 5,600만 대를 돌파할 것으로 추정된다. 다시 말해, 2040년 판매되는 승용차의 57%, 전 세계

*정회원, 국립소방연구원 대응기술연구실 선임연구원(E-mail: safetysoabang@korea.kr)
Member, Researcher, Fire Technology Research Division, National Fire Research Institute

**국립소방연구원 연구기획지원과 시설연구사·박사

Ph.D., Research Officer, Planning and Support Division, National Fire Research Institute

***국립소방연구원 대응기술연구실 연구원

Junior Researcher, Fire Technology Research Division, National Fire Research Institute

****교신저자, 정회원, 국립소방연구원 대응기술연구실 선임연구원(Tel: +82-41-559-0552, Fax: +82-41-559-1108, E-mail: hsk8658@korea.kr)

Corresponding Author, Member, Researcher, Fire Technology Research Division, National Fire Research Institute

승용차의 30% 이상이 전기차가 될 것이라는 전망이다. 이처럼 전기자동차는 CO2 배출량을 줄이기 위한 방안으로 배터리로 구동되는 제품이 점점 보편화되고 있다. 전기 자동차에서 단일 배터리 팩의 화재 위험을 추정하기는 어렵다. 물리적 충격, 전기적 문제, 방화 및 기타 원인으로 인한 차량 화재 원인을 밝히기 위해 많은 연구들이 진행되었지만, 대부분의 연구는 가솔린 자동차에 집중하고 있다. 따라서 본 연구는 기존 가솔린자동차의 위험성과는 다른 전기자동차의 화재 성상, 화재 진압 시 안전관련 사항 등을 도출하기 위한 목적으로 수행하였다(Yang, 2015; Bloomberg, 2019; Ahn, 2021).

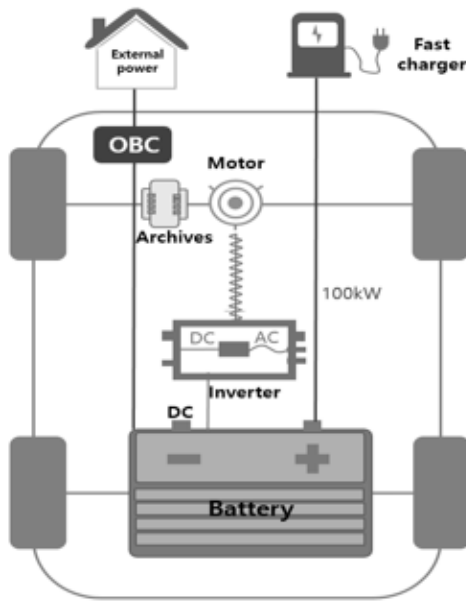


Fig. 1. Electric-Battery-Powered Vehicle Internal Structure

2. 실험방법 및 측정

2.1 차량 테스트

본 실험은 전기자동차와 가솔린자동차의 실제 화재 비교를 통해 화재성상 등을 파악하였다. 차량 특징은 Table 1과 같다. 정확한 비교를 위해 동종의 차량을 사용하였으며, 실험은 동일한 차량 중 구동방식만 다른 차량으로 선전기자동차의 주요 특징은 LiB팩이 뒷좌석 하단부터 트렁크까지 배치되어 있으며, 구동방식은 Fig. 1과 같이 배터리(용량 50 Ah)에서 배터리와 직류를 모터에 적합한 교류로 변환해주는 인버터를 지나 모터에서 내연기관 엔진처럼 차량 바퀴를 회전시키는 구동력을 발생(출력 50 kW, 최대토크 167 Nm)하고, 감속기를 통해 모터의 RPM을 주행속도에 맞게 변환(가솔린 차량의 변속기 역할)한 뒤, 감속기를 통해 전달된 동력으로 차량 앞바퀴를 구동하여 차량을 주행하게 된다.

가솔린 자동차의 주요 특징은 가솔린(휘발유)을 연료로 하는 내연기관으로 엔진에서 흡입-압축-폭발-배기와 같은 사이클을 각 기동마다 반복적으로 작동하며 동력이 발생하고, 이 동력을 이용하여 차량이 움직이게 된다(Watanabe et al., 2012).

2.2 테스트 조건

Table 2는 차량의 테스트 조건을 나타낸다.[4] 두 차량 모두 네 개의 창문이 닫힌 상태이며, 전기차량은 만충, 가솔린차는 3 L의 가솔린이 채워진 상태로 실험조건을 세팅하였다. 가솔린 차량은 만충을 했을 때 소방차를 대비하여 진행하였지만, 폭발위험성이 높고, 안전확보를 위하여 최소 연료계통의 연료만 채울 수 있는 양(3 L)으로 진행하였다. 차량의 점화는 우측 뒷 바퀴쪽에 2 L 정도의 등유를 사용하여 점화하였고, 불이 꺼질 때까지 차량을 태우는 실험을 진행하였다. Fig. 2와 같이 두 차량의 실험의 비교를 위해 동일한 점화 위치와 점화원 조건을 설정하였다.

Table 1. Technical Specification of the Vehicles

Test vehicle	Drive powertrain layout	Dimensions			Gross weight
		Length	Width	Height	
Electric-battery-powered vehicle	Front motor/front drive	3,595 mm	1,595 mm	1,700 mm	1,185 kg
Gasoline -powered vehicle	Front engine/front drive	3,595 mm	1,595 mm	1,700 mm	1,040 kg

Table 2. Test Vehicle Conditions

Test vehicle	Door windows	Amount of fuel in fuel tank	Charge ratio of LiB	Ignition location	Ignition source
Electric-battery-powered vehicle	Closed	-	100%	Right-rear soft bumper	2 L of kerosene fuel
Gasoline -powered vehicle	Closed	3 L of gasoline	-	Right-rear soft bumper	2 L of kerosene fuel

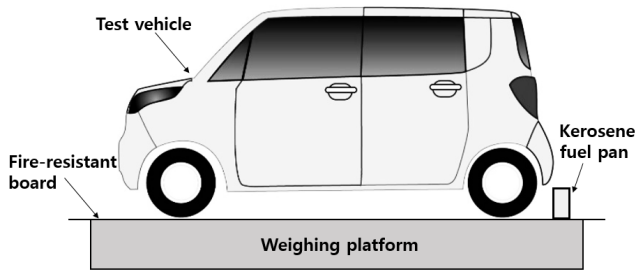


Fig. 2. Experimental Configuration of the Weighing Platform Used to Measure the Mass Loss and the Mass Loss Rate of the Burning Test Vehicle

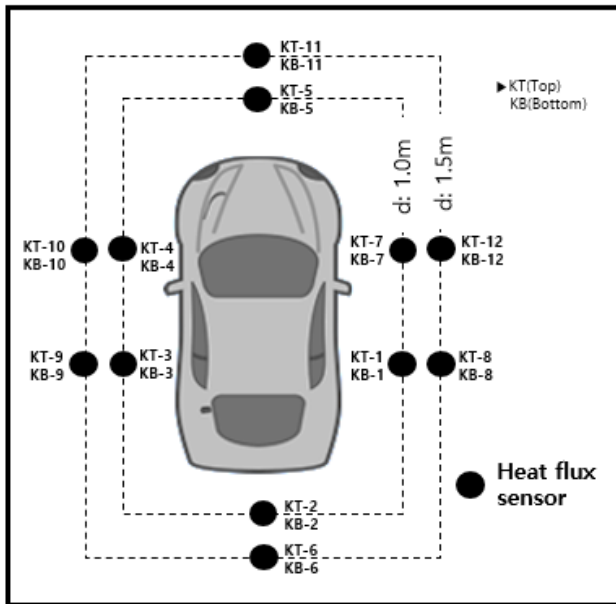


Fig. 3. Experimental Configuration of Radiant Heat and Heat Flux Sensors Around the Test Vehicle

2.3 측정 센서

각 실험 차량에서 방출하는 외부 온도를 측정하기 위해서 차량 전·후방, 좌·우측, 앞뒤 타이어로 측정지점을 설정하였다. 각 지점은 차량으로부터 1.0 m, 1.5 m 떨어진 곳에 배치하였으며, 한 지점당 센서는 2개(상단 1.5 m, 하단 0.5 m) 씩 설치하였다. 세부적인 센서의 위치는 Fig. 3과 같다. 센서의 명명은 지점별 상단은 KT (Top)이라고 나타내고, 열전대 아래쪽은 KB (Bottom)으로 표기하였다. 더불어, 차량의 실내 온도를 측정하기 위해 엔진, 보닛, 상단, 내부, 하부에 센서를 설치하고 전기차는 배터리부분에 추가로 센서를 설치하였다.

추가적으로 실험 중 차량의 화재성상 및 특성을 영상으로 분석하기 위해 실험 차량을 중심으로 8방향에 CCTV를 설치하였다.



Fig. 4. Burning Process Picture of the Gasoline-Powered Vehicle

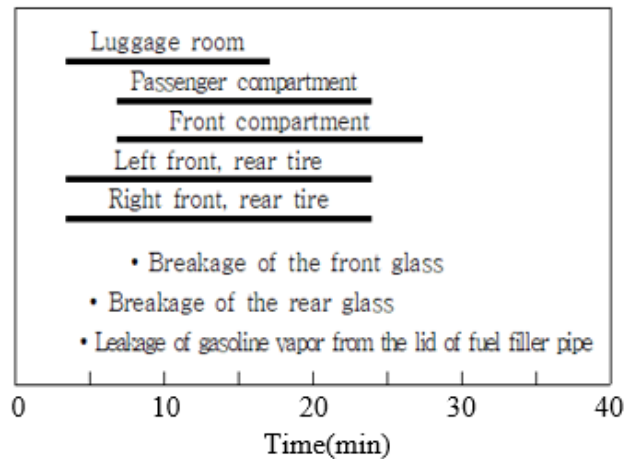


Fig. 5. Burning Process Timetable of the Gasoline-Powered Vehicle

3. 실험 결과

3.1 가솔린 및 전기자동차의 화재확산과정

차량의 연소 시간대별 화재확산에 따른 매커니즘 분석을 위해 화재확산과정을 살펴보았다. 화재확산 시간표는 CCTV 영상을 분석하여 가솔린 차량의 각 지점별 발화시간 및 연소시간을 추출하고, 가솔린 차량과 전기차의 엔진룸 및 배터리가 각각 다른 위치에 있어 동시 비교를 위하여 앞·뒤 점화를 하여 실험하였다.

3.1.1 가솔린 차량의 화재확산과정

Figs. 4와 5는 가솔린 차량의 화재는 뒤쪽 연소 시작점을 기준으로 약 5분 후 뒤쪽 타이어부터 연소가 일어나기 시작하고, 이어 앞쪽 타이어까지 화재가 확산됨과 동시에 트렁크에서 발화가 시작되었다. 약 8분 뒤에 차량 내부로 화재가 전이되었고, 운전석 시트 등 합성소재 등으로 구성된 부분이 착화 후 8분 후 전, 후면 유리창이 깨졌다. 화재실험 중 타이어가 착화되면서 폭음을 동반한 폭발이 발생하였으며,

엔진룸 및 실내에서 지속적인 폭발이 반복되었다. 이렇게 30분까지 연소가 진행되었고, 중간에 작은 폭발도 일어났다.

가솔린 차량이 연소가 되면서 가연성 연기로 주변을 가득 채웠다. 연소가 시작되고 약 40분 동안 가솔린 차량은 완전 연소시켰다.

3.1.2 전기자동차의 화재확산과정

Figs. 6과 7은 전기자동차의 연소되는 현장 사진과 연소 시간표이다. 전기자동차의 화재확산과정에서 일어나는 각 부분의 연소 시간은 측정하였고, 가솔린 자동차의 연소 시간표와 같이 표기된 점은 불이 난 시점을 나타낸 것이다. 전기자동차도 뒤쪽 연소 시작점을 기준으로 약 5분 후 뒤쪽 타이어부터 연소가 일어나기 시작하고, 아래쪽 하단부터 타이어까지 불이 붙었고, 약 8분 후 타이어가 터지면서 폭발이 일어났



Fig. 6. Burning Process Picture of the Electric-Battery-Powered Vehicle

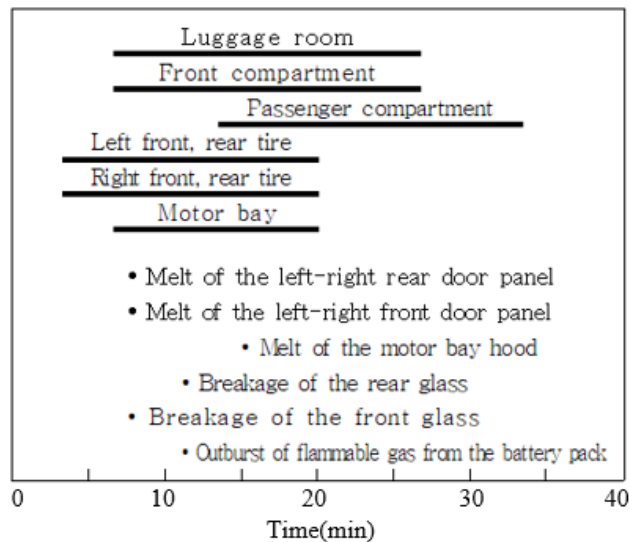


Fig. 7. Burning Process Timetable of the Electric-Battery-Powered Vehicle

고, 불꽃이 빠르게 아래쪽에서 불이 타고 올라오면서 왼쪽부터 앞과 뒤쪽 문이 불에 연소가 되더니, 보닛 쪽도 같이 연소가 되었다. 이 확산된 불은 앞쪽과 뒤쪽 창문을 깨뜨리고, 오른쪽 및 왼쪽 문은 거의 녹아버린 상태가 되었다. 약 15분 후 운전석과 조수석 등 차량 내부의 플라스틱, 패브릭, 인조가죽 재질로 되어진 부분 등 가연물이 많아 계속 연소가 확대 되면서 왼쪽 오른쪽 뒤쪽 창문까지 깨졌다. 실내에서의 화염은 창문이 깨지면서 더 확대 되어 차량 앞부분의 부품들이 떨어져 나가고, 시커먼 연기로 가득 찼다. 내부에서 폭발로 추정되는 불꽃이 2차레에 걸쳐 일어났다. 배터리의 온도 측정 결과도 확산 양상과 비슷하게 나온 것으로 보아 이는 차 내부 뒷좌석에 아래에 있는 배터리가 2차레에 걸쳐 터진 것으로 예상된다. 불은 점화 후 약 40분 정도 후에 완전히 타버렸다.

3.2 가솔린 및 전기자동차의 연소 온도

가솔린 차량과 전기자동차의 화재성상실험에서의 연소 온도 측정 결과이다. 온도 측정은 차량 외부 KT 1~12 (KB 1~12) 총 24곳을 측정하였고, 차량 내부는 상단, 하단, 내부, 엔진, 전기차의 경우 배터리까지 측정한 온도 결과이다.

3.2.1 가솔린 차량의 연소 온도

가솔린 차량 화재 성상 실험에서의 연소 시 외부에서 측정된 센서는 KT에서 12와 KB 1에서 12까지이다. 특히 외부에서 측정된 온도 데이터 중 지지대의 위쪽인 KT (Top)의 데이터에서 높은 온도 값을 보였다. 이 측정된 온도를 살펴보면, 가솔린 차량의 외부에서 측정된 최고 온도는 935.4 °C까지 상승하였으며 Fig. 8은 가솔린 차량의 외부에서 측정된 온도 데이터를 나타낸 결과 값이다.

Fig. 9는 가솔린 차량의 연소된 내부 온도이다. 가솔린 차량 화재 성상 실험에서의 연소 시 내부에서 측정된 센서는 차량 엔진 부분, 보닛, 차량 실내의 운전석과 조수석 사이, 상단과 하단 부분 총 5곳의 센서를 부착하여 연소 시 온도를

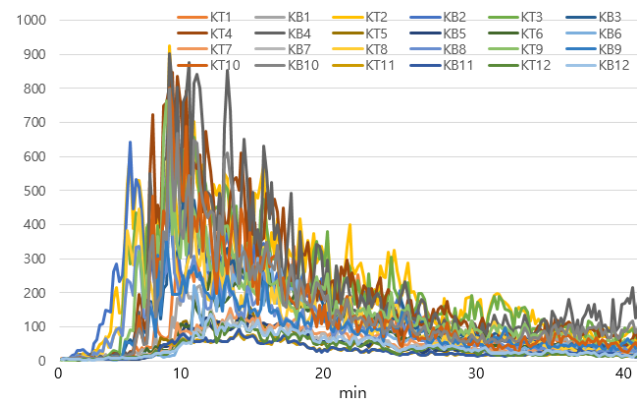


Fig. 8. Outside Temperature Data According to Time of Combustion of Gasoline-Powered Vehicle

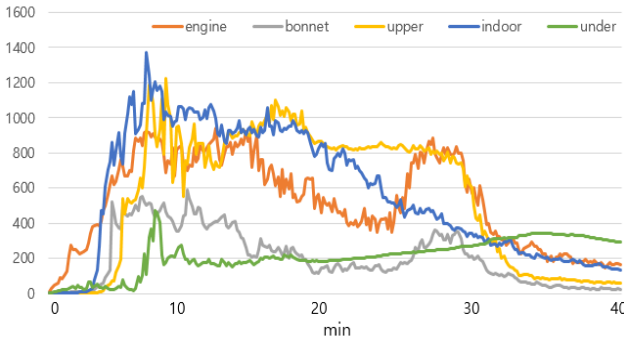


Fig. 9. Inside Temperature Data According to Time of Combustion of Gasoline-Powered Vehicle

측정하였다.

가솔린 차량의 측정된 내부 온도 데이터는 실내(Indoor) > 차량 상단(Upper) > 엔진(Engine) > 보닛(Bonnet) > 차량 하단(Under) 순으로 높은 온도가 측정되었고, 내부 측정된 데이터 중 가장 높은 온도로 측정된 내부(운전석과 조수석 사이) 온도는 최대 1,362.9 °C까지 측정되었다. 특히, 차량 내부 온도 데이터는 차량 내부인 온도가 가장 높게 측정된 이유는 연소 되어질 가연물이 가장 많은 것으로 예상된다.

3.2.2 전기자동차의 연소 온도

전기자동차의 화재 성상 실험에서의 연소 시 외부에서 측정된 센서도 가솔린 차량의 센서와 같이 KT 1에서 12와 KB 1에서 12까지이다.

외부에서 측정된 온도 데이터 중 가장 높은 온도는 631.0 °C 까지 측정되었으며 Fig. 10은 전기자동차의 외부에서 측정된 온도 데이터를 나타낸 결과 값이다.

Fig. 10은 전기자동차의 연소 된 내부 온도이다. 전기자동차는 연소 시 내부에서 측정된 센서는 차량 엔진, 보닛, 차량 실내(운전석과 조수석 사이), 상단과 하단, 배터리 총 6곳의 센서를 부착하여 연소 시 온도를 측정하였다. 가솔린 차량과 다른 점은 전기자동차는 배터리의 온도를 측정하는 것이 다른 점이 있다.

전기자동차 점화가 시작된 시점부터 연소가 끝날 때까지 총 6곳의 측정된 내부 온도 데이터를 보면 실내(Indoor) > 배터리(Battery) > 보닛(Bonnet) > 엔진(Engine) > 차량 상단(Upper) > 차량 하단(Under) 순으로 높은 온도가 측정되었고, 내부 측정된 데이터 중 가장 높은 온도로 측정된 실내(Indoor) 온도는 최대 1,362.0 °C까지 측정되었다.

연소가 되면서 일정 온도 이상을 지난 경우는 번 아웃(BURN OUT)이 되어 측정이 불가하였다.

실내(Indoor) 온도는 가솔린 차량과 동일한 양상을 보였으나, 가솔린 차량에서 볼 수 없던 배터리(Battery)는 두 차례정도 온도가 내려갔다 바로 올라가는 온도 양상이 나타났는데, 이는 화재확산과정에서 볼 수 있었던 배터리 쪽 폭발이

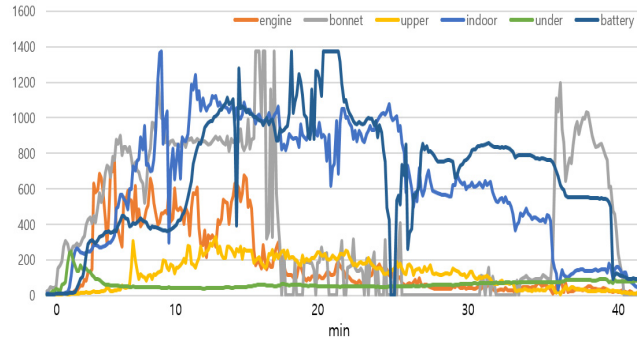


Fig. 10. Inside Temperature Data According to Time of Combustion of Electric-Battery-Powered Vehicle

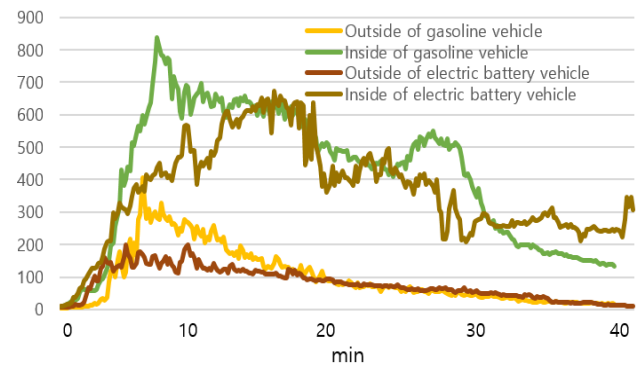


Fig. 11. Comparison of Outside and Inside Temperatures between Gasoline and Electric-Battery Vehicle

두 차례 정도 일어난 것과 동일하게 나타났다. 이는 연소과정 중 LiB 팩 중 터지면서 측정된 것 같다.

3.3 가솔린 및 전기자동차의 내·외부 연소 평균 온도 변화 비교

Fig. 11은 가솔린 차량과 전기자동차의 화재 성상이 어떤 지 보기 위하여 연소 시 측정된 외부(Outside) 온도의 평균값과 내부 온도의 평균값 온도를 비교 해봤다. 평균 온도를 비교해 본 결과 전기자동차의 외부 평균 온도가 가장 낮고, 가솔린 차량의 내부(Inside) 평균 온도가 가장 높은 것으로 나타났다.

3.4 가솔린 및 전기자동차의 화재확산과정 변화 비교

Fig. 12는 가솔린 차량과 전기자동차의 화재 확산과정을 비교해보았다. 전기차의 아래쪽 하단 부분부터 연소가 확산 되었는데 수화물 보관부분, 뒷 좌석, 운전석, 조수석 부분이 가솔린 차량보다 먼저 연소가 발생되었고, 가솔린 차와 비교 하였을 때 연소 평균 온도는 차이가 낮지만, 대부분 비슷한 양상으로 연소가 확산 되는 것을 볼 수 있었다.

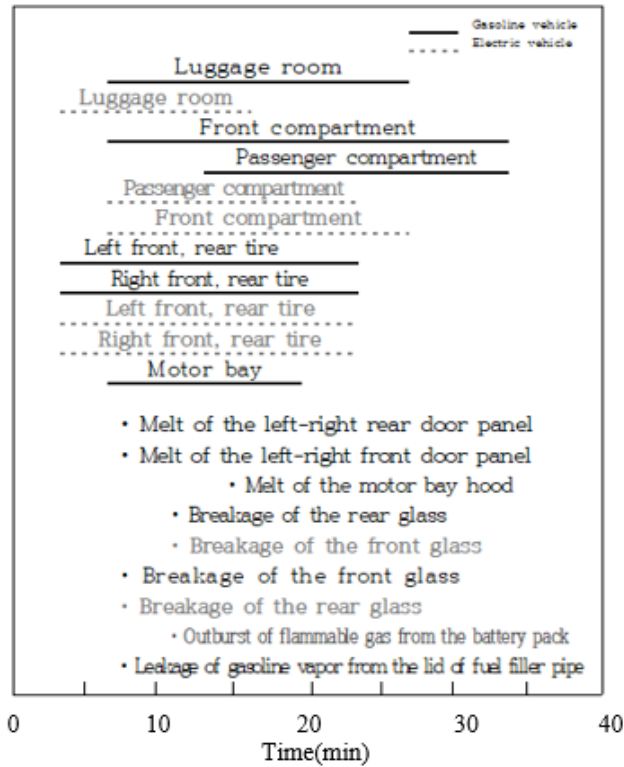


Fig. 12. Burning Process Timetable of the Gasoline and Electric-Battery Vehicle

4. 결론

최근 친환경차 수요가 증가하고 있고, 전기자동차의 화재 성장, 진압 시 안전 사항 등 파악을 위해 가솔린 차량과 실물 화재 실험으로 화재성상을 비교하였다. 정확한 비교를 위해 비슷한 차량, 점화위치, 점화원 등을 최대한 동일하게 하여 실험을 진행을 하였다. 연소 온도 특성은 가솔린 차량의 외부 최고온도는 935.4 °C, 내부 최고온도는 1,362.9 °C까지 상승하였다. 전기자동차의 외부 최고온도는 631.0 °C, 내부 최고온도는 1,362.0 °C로 가솔린 차량이 전기자동차보다 더 높은 온도특성을 나타냈다. 이러한 특성은 동일한 조건을 위해 전기자동차를 만충시키고, 가솔린 차량도 휘발유를 일정 부피를 채웠는데, 연소되면서 휘발유의 영향으로 가솔린 차량이 더 화재확산이 많이 일어나고 높은 온도까지 상승한 것이고, 전기자동차는 배터리의 일부 LiB 팩이 폭발 양상은 보였지만 가솔린 차량처럼 초반에 연소 확산이 일어나지는 않고 시간이 지날수록 내부 온도가 올라가는 것으로 측정되었다.

본 연구에서는 전기자동차와 가솔린 자동차의 실물화재 연소실험을 통해 화재위험성에 대하여 알아보기위해 연소 온도를 측정하였다. 실험을 통해 풍향과 풍속의 영향을 최소화 하기 위하여 차단막을 설치하였으나, 강한 바람에 의해 화염이 특정 방향으로 이동하면서 데이터 편차가 있었다.

특히, 발생 점화는 오른쪽에서 시작되었지만, 외부 풍향에 의해 왼쪽으로 연소가 많이 확대되는 경향을 볼 수 있었다. 또한, 높은 열로 인해 일부 센서가 오류(BURN OUT) 등으로 온도 데이터 취득 제한이 되는 한계가 있었다.

산업발전으로 인한 재난유형이 다양화, 복잡화가 되고있어 재난을 예측하기는 어렵다. 특히, 친환경적인 요소로 전기차 보급이 늘어남에 따라 발생하는 전기차 화재에 대한 불안감은 증대되고 있다.

국내·외 내연기관 화재 관련 논문 중 차량의 타기종에 대한 화재실험은 있으나, 동일한 차종(가솔린차와 전기차)으로 화재 특성 연구를 진행한 것은 없다. 이 연구를 통해 가솔린 차량과 전기차 화재 위험성에 대해 정성적으로 이해를 돕고, 전기차 화재에 대한 대응 방안 마련, SOP (전기차) 대응 지침 개정 등에 활용하여 대책 마련을 하고자 한다. 또한, 전기차 화재 대응에 있어 제조사별로 전원을 차단할 수 있는 배선의 위치가 어디에 있는지 소방대원 전기차관련 구조 활동 지침은 추가적인 도출이 필요하다.

따라서, 향후 전기차의 Lithium Battery Pack (LIB), 차량 내부에 탑재되는 배터리 용량별 화재양상, 열방출을 측정 등 실험 연구로 다양한 결과를 도출하여 전기자동차 화재 대응과 관련된 대책 마련에 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

감사의 글

본 연구는 소방청 소방대응력 향상을 위한 연구개발지원 사업(1761002000)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

References

Ahn, J.H. (2021). *Eco-Friendly Vehicle Master Plan*. 4th, 2021-2025, Ministry of Trade, Industry and Energy.

Bloomberg, M. (2019). *Global EV Outlook*. IEA, Vol. May, pp. 9-24.

Watanabe, N., Sugawa, O., Suwa, T., Ogawa, Y., Hiramtsu, M., Tomonori, H., et al. (2012). Comparison of fire behaviors of an electric battery powered vehicle and gasoline-powered vehicle in a real-scale fire test. *Second International Conference on Fires in vehicles*, September 27-28. Chicago, USA.

Yang, H.W. (2015). *Eco-friendly car*. Ministry of Environment. pp. 21-22.

Received	November 9, 2021
Revised	November 15, 2021
Accepted	November 30, 2021