주차 차량 전기화재 원인 분석 및 위험 진단에 관한 연구

Root Cause Analysis of Electric Fires and Risk Diagnosis of Parked Vehicles

최민석*

Choi, Minseok*

Abstract

Generally, a vehicle's electrical circuits are protected against overcurrent. However, an overcurrent protector cannot completely prevent fires. In particular, fires that occur in parked vehicles are often caused by Joule heat and arc faults owing to contact failures, partial disconnection, arc tracking, and connection errors in the circuit that continues to receive electricity from the battery. Since the flowing current in such a case is not an overcurrent, the fuse will not react and may thereby cause a fire. Additionally, if a wire burns and causes a short circuit after the fire, the fuse will react to cut off the electricity supply, but cutting off the electricity supply after ignition has no significance. Furthermore, since an overcurrent protection device cannot determine whether Joule heat and arc faults are occurring in an electrical circuit, a thermal imaging test is required in addition to visual inspection and should be conducted during vehicle inspection.

Key words : Vehicle Electric Fire, Thermal Imaging Test, Fire Investigation

요 지

차량의 전기 회로는 과전류로부터 보호되지만 과전류 방지 장치가 화재를 완전히 막을 수는 없다. 특히, 주차된 차량에서 자주 발생하는 화재는 상시전원 회로에서 접촉 불량, 부분 단절, 아크 트래킹, 회로 연결 오류에 의한 줄 열과 아크로 발생한다. 이 경우 흐르는 전류는 과전류가 아니기 때문에 퓨즈가 반응하지 않아 화재가 발생할 수 있으며, 화재가 발생하고 나면 전선 단락으로 퓨즈가 전기를 차단하지만 발화 후 전기 차단은 의미가 없다. 과전류 보호 장치는 회로에서 줄열과 아크가 발생하는지 알 수 없기 때문에 자동차 점검 시 육안 검사 외에 열화상 진단이 포함되어야 한다.

핵심용어 : 자동차 전기화재, 열화상 검사, 화재원인 조사

1. 서 론

자동차 안전기능의 첨단화에도 불구하고 주차된 차량에서 화재는 지속적으로 발생하고 있다. 운행 중 화재가 발생하면 초기 진화나 추가 피해 우려가 없는 장소로 이동이 가능하나, 운전자가 없는 주차된 차량에서 화재가 발생하면 인지 및 초기 대응이 어려워 자동차의 소손 뿐 아니라 연소 확산으로 인한 추가 피해가 발생할 수 있다. 특히 주변이 개방되어 있는 지상 보다 필로티 구조 건물 주차장, 상가나 아파트 지하 주차장은 건물 상층부로 빠르게 확산되어 대형 화재로

발전할 수 있다. 소방청 국가화재 정보센터 통계에 의하면 2019년 9월까지 발생한 3,188건의 자동차 화재 중 555건의 화재가 주차장에서 발생하였으며, 차량의 발화부위는 엔진 룸과 운전석 등 실내에서 1,990건의 화재가 발생하였다. 자동차 내부에서 화재가 발생하면 물을 살수하여도 차체에 막히기 때문에 내부에 직접 살수를 하지 않는 이상 진화가 어렵다. 스프링클러와 같은 자동 소화설비가 작동을 해도 진화가 어려운 이유이다. 전기적 요인으로 주차된 차량에서 화재가 발생하는 이유는 엔진이 꺼져 있는 상태에서도 전원이 공급되는 상시전원에 기인한다. 자동차의 배터리에서

*교신저자, 정회원, 경기대학교 도시방재학과 박사과정(Tel: +82-31-299-5303, Fax: +82-504-0004-0335, E-mail: firecms@naver.com)
Corresponding Author, Member, Ph.D. Candidate, Department of Urban Disaster Management Engineering, Kyonggi University

시동모터로 가는 전선, 제너레이터에서 배터리로 가는 전선, 브레이크등, 실내등, 비상등, 트렁크등, 시계 등은 시동이 꺼져 있어도 배터리로 부터 전기가 공급되는 장치이다. 또한 사용자의 편의나 안전을 위하여 설치하는 블랙박스 등의 부속 장치도 상시전원을 이용한다. 본 연구에서는 주차된 자동차에서 발생한 화재 중 전기적인 원인으로 발생한 사례를 유형별로 분석하고 퓨즈만으로 전기적 발열을 차단하지 못하는 이유를 확인하여 자동차 화재 예방을 위한 효율적 방법을 제시하고자 하였으며, 향후 자동차 검사 규칙 개선 등에 본 연구결과가 활용되기를 기대한다.

2. 상시전원 회로의 발화열원

전기화재 대부분의 열원(Ignition source)은 줄열에 의한 저항발열에 의하여 발생한다고 할 수 있다. 회로의 저항에 정격전류 이상의 과전류가 흐르면 저항발열이 증가하게 되며 최후에는 회로 고장이나 화재로 까지 진전될 수 있다. 전기에너지가 전선의 절연피복 등 고체 가연물을 착화시키기 위해서는 가연물을 열분해 시킬 수 있는 온도가 지속되어야 하므로 단락으로 발생하는 아크는 가연성 증기 등 기체 가연물이 존재하지 않는 이상 발화열원이 될 수 없다. 자동차 전기회로도 단락이 발생하여 과전류가 흐르면 퓨즈가 즉시 용단되고 전기가 차단되어 열이 지속적으로 발생할 수 없게 되므로 단락으로 고열의 아크가 발생하더라도 지속성이 없어 발화열원이 될 수 없다. 하지만 과전류 보호 장치가 반응하지 않는 전기 회로의 이상 상태에서는 화재로 진전될 수 있는 발열이 지속될 수 있다. 대표적인 전기 회로의 이상 상태는 접촉불량, 반단선, 트래킹 등이 있다. 접촉 불량은 접촉부분의 접촉저항이 증가하였지만 전체 회로에 미치는 영향은 미미하거나 없기 때문에 회로 보호 장치는 작동하지 않는다. 접촉 불량이 발생하면 접촉부의 접촉저항이 증가되어 국부적으로 발열이 일어나고 산화피막이 형성되면서 발열량이 더욱 커지게 되어 발화에 이르게 된다. 반단선은 전로가 끊김과 이어짐을 반복하거나 단면적이 감소한 상태이다. 전선이 붙어 있다 끊어지는 순간 아크가 발생되며, 아크가 지속되면 주위의 절연체가 탄화되어 발화될 수 있다. 아크는 전로의 온도가 상승하는 과전류 현상이 아니기 때문에 퓨즈가 용단되지 않을 수 있다. 소선 일부만 끊어진 상태의 단면적 감소는 면적이 감소하였으나 끊어진 상태가 아니므로 아크는 발생하지 않는다. 그러나 단면적 이 감소한 부분은 국부적으로 저항이 높기 때문에 접촉 불량과 같은 경로로 발화될 수 있다. 이 경우도 저항 증가 외에 전류가 회로 전체에 미치는 영향은 미미하므로 과전류 보호 장치는 반응하지 않는다.

트래킹현상을 보면, 커넥터 등 고체절연체는 매우 우수한 절연체이므로 정상적인 상태에서는 누설전류가 흐를 수 없지만, 고체절연체 표면에 수분, 도전성 분진 등이 쌓여

오염된 곳의 표면을 따라 누설전류가 흐르게 되면 줄열에 의하여 표면이 국부적으로 건조되고 절연물 표면의 부차물 간에 미소발광방전(Scintillation discharge)현상이 일어난다. 이러한 미소발광방전이 지속되면 절연체 표면이 점진적으로 열화되고 열화가 지속되면 탄화 도전로가 형성되면서 절연이 파괴되어 매우 큰 아크 전류가 흐르게 된다. 아크의 온도는 수 만도에 이르는 고온이지만 아크 전류가 작기 때문에 과전류 보호 장치가 작동하지 않을 수 있다.

3. 자동차 전기화재 사례 분석

3.1 와이어링 하니스 절연손상

차량의 여러 전기장치와 연결된 전선과 커넥터 등 주변 부품을 하나의 형태로 집약 시킨 유닛인 하니스(Wiring harness)는 여러 개의 전선이 다발로 묶여있고 여러 장치가 커넥터로 연결되어 있어, 절연피복 손상으로 인한 단락, 접촉불량, 트래킹 등이 발생할 수 있다(Choi and Lee, 2019). 하니스는 Fig. 1과 같이 콜게이트 튜브(Corrugate tube)로 보호되어 있고, 내측이 절연성 수지로 되어 있는 새들로 잘 고정 되어 있으며 커넥터도 견고하게 삽입되도록 설계되어 있어 정상 회로에서 절연손상이나 접촉 불량 등은 발생하기 어렵다. 하지만 수리나 추가 부품 설치를 위해 작업 편의상 콜게이트 튜브나 새들을 생략하는 구간이 생기는 경우가 있으며 이런 구간에서 절연 피복 손상 등이 발생할 수 있다.

Fig. 1. Wiring Harness

Fig. 2는 약 24시간 이상 주차되어 있던 차량에서 화재가 발생한 사례이다. 차량 외표는 내부에서 출화되어 좌측 부분만 제한적으로 소화된 상태이고 내부는 조수석 대시보드 아래 부분이 심하게 소화된 상태로 전선도체와 전기 장치가 노출되어 있는 상태로 전선에 단락흔이 식별되며, 소화된 하니스에 콜게이트 튜브가 없는 것으로 보아 소화된 부분도 튜브로 보호되어 있지 않은 것으로 판단된다. 보호 튜브가 없는 전선의 절연피복이 손상될 경우 순간 단락이 발생할 수도 있으나 이런 경우는 단락에 의한 과전류로 퓨즈가

용단되어 화재로 진전될 가능성은 낮은 것으로 판단된다. 단락된 부분은 대시보드와 차체를 결합한 부분이며 이 부분이 국부적으로 심하게 탄화된 것으로 보아 전선이 대시보드에 눌러 반단선이 발생한 것으로 추정된다.

Fig. 2. Wiring Harness Fire Case

3.2 자동차 부품 결함

자동차 부품 결함에 의한 화재에 있어 Park et al. (2019)에 의하면 전력분배모듈(IPDM), ABS (anti-lock brake system) 모듈 등의 자동차 부품에서 화재 위험성이 있는 결함이 발견되어 대규모 리콜 사태가 발생하기도 하였다. 이러한 장치의 전기회로는 견고한 덮개로 보호되어 있어 외부 화염에 의하여 단락이 발생할 수 없는 부분으로 부품 내부 회로의 단락은 발화열원일 가능성이 크다. Fig. 3의 화재 사례는 주차 한지 약 2시간 경과 후 엔진룸에서 화재가 발생한 사례이다. 엔진룸 내부 중 ABS모듈이 설치되어 있는 부분에서 확산된 연소형태로 모듈 주변의 변색 정도가 상대적으로 심한 상태이다.

Fig. 3. fire of the Anti-lock Brake System

피해 차량의 전장회로 상 ABS 모듈은 상시전원이 공급되는 회로이다. 모듈 회로기판에 단락흔과 국부적 탄화흔적이 식별되는 것으로 보아 모듈 회로의 절연 파괴에 의한 것으로 판단된다. 사례와 같이 부품 내부에서 단락이 되었음에도 과전류 보호 장치가 화재를 예방하지 못하였다.

3.3 임의적 배선 화재

자동차의 자가 수리 및 튜닝에 관심을 갖는 운전자의 증가로 사용자 과실에 의한 화재도 빈번하게 발생하고 있다 (Kang et al., 2017). 자동차의 전기장치는 매우 복잡한 회로로 되어 있어 회로 결선 오류나 규격에 맞지 않는 부품이 사용될 경우 화재로 이어질 위험성이 크다. 사용자 과실에 의하여 주로 발생하는 화재원인은 보호 장치 결선 오류와 보호 장치를 무시한 회로 구성이다.

Fig. 4. Fuse Connection Error

Fig. 4는 퓨즈의 결선도로 (a)와 같이 배터리와 연결된 + 전선을 input 단자와 연결 후 out put단자에서 부하로 연결해야 부하에서 전기적 이상상태가 발생할 경우 퓨즈가 회로를 보호할 수 있으나, (b)와 같이 전원 측과 부하 측 전선을 모두 input단자에 연결하게 되면 퓨즈는 단지 전선을 이어주는 연결고리 역할 외에 과전류로부터 회로를 보호할 수 없게 된다.

Fig. 5. Fire Cases by Arbitrary Electrical Wiring

Fig. 5의 차량은 주차한지 약7시간 경과 후 화재가 발생하였다. 피해자가 내부 전기장치를 추가하기 위해 임의로 연결한 전선이 조수석 의자 틈에 끼어 절연피복이 손상되면서 자체와 접촉되어 단락되었다. 단락이 발생하였음에도 즉시 전기가 차단되지 않은 이유는 배터리에서 부하까지 아무런 보호 장치 없이 배선되었기 때문으로 이런 경우 단락부의 발열을 막을 수 없게 된다.

4. 아크가 회로에 미치는 영향 분석

자동차의 각 회로는 퓨저블 링크(fusible link), 퓨즈, 회로 차단기 등 보호 장치에 의해 회로가 보호된다. 배터리 음극은 접지 상태를 유지하기 위해 자체에 연결되어 있고 양극에서 모든 회로에 전기를 보내며 정상회로 이외의 누설전류는 자동차 회로의 고장이나 화재로 진전될 수 있어 퓨즈 등에 의해 보호되도록 회로를 구성한다. 퓨즈는 전류가 전로를 통해서 흐를 때 과전류 등의 원인으로 일정 온도 이상이 되면 금속편이 녹아 회로를 차단시키는 일을 하며, 한국산업 규격(KS R ISO 8820)의 자동차 퓨즈는 정해진 시간 동안 전류가 규정 수치에 도달할 때 관련 회로를 차단할 것을 요구하고 있다. Table 1은 퓨즈에 과전류가 흘렀을 때 퓨즈가 용단되는 시간을 나타낸 것이다. 정해진 시간 동안 규정 수치 이상의 전류가 흐를 때 퓨즈가 용단되어 전기를 차단하도록 되어 있고, 과전류가 110%에서는 퓨즈가 용단되지 않을 수 있고, 135%에서는 최소 0.75에서 최대 1800초 이내에 용단되어야 한다. 즉 135% 상황에서는 용단되지 않거나 오랜 시간 용단되지 않을 수 있다. 하지만 대부분의 단락 상황에서는 200% 이상의 과전류가 흐르므로 퓨즈는 즉시 용단된다.

Table 1. Time Current Characteristics

% of Rating	Opening Time Min/ Max(s)
110	363.000/
135	0.75/1800
200	0.15/5
350	0.04/0.5
600	0.02/0.2

통전 상태의 자동차 전기 회로에서 전기적 이상 상태가 발생할 경우 화재로 진전될 수 있는 전기적인 발열현상의 지속 가능성을 확인하기 위해 자동차 상시전원 회로 중 하나인 브레이크등이나 트렁크등에 사용되는 5W 램프로 회로를 구성하였다. Fig. 6과 같이 12V 배터리에 0.3SQ 자동차용 전선에 5W 시그널램프가 15A, 20A 퓨즈로 보호되도록 회로를 구성한 후 절연 피복 일부를 손상시켜

도체가 -극에 혼촉되도록 하여 퓨즈 용단 여부를 확인하였다.

(a) circuit configuration (b) Arc current value

Fig. 6. Fuse Operation Experiment

전선의 절연피복이 손상되어 노출된 도체가 자체와 혼촉되거나, 전선이 외력 등에 의하여 소선일부 또는 전부가 절단된 반단선 상태, 접속부품에서 소선 일부가 이탈된 상태 등 3가지 가능성에 대하여 실험을 실행하였다. 첫 번째로 전선의 절연피복이 손상되었을 경우를 가정하여 피복이 손상되어 노출된 도체를 -극에 혼촉시켰고, 두 번째로 외력 등에 의하여 전선의 소선 일부 또는 전부가 단선된 반단선 상태에서 차량 진동에 의해 붙음과 떨어짐이 반복되도록 하였다. Table 2의 결과와 같이 첫 번째, 두 번째 상황에서는 아크가 발생하면서 순간 전류가 퓨즈 용량의 200%를 초과하거나 육박하여 15A, 20A 퓨즈가 즉시 용단되었다. 세 번째로 접속부품에서 이탈된 연선의 소선 1~2선을 -극 혼촉시켰다. 아크가 발생하고 퓨즈용량의 135%를 초과하는 전류가 흘렀음에도 퓨즈는 용단되지 않고 통전상태가 유지되었다.

Table 2. Test Result

Test type	Off Rating	Use Operation
Conductor whole contact	200	S
Partial Disconnection	200	S
Conductor partial contact	135	F

Figs. 7(a), (c)와 같이 +회로 전선일부가 -단자에 혼촉되면 (b), (d)와 같이 도체가 용융되면서 극간 접촉이 차단되어 더 이상 접촉에 의한 아크나 발열 현상은 발생하지 않았다. 첫 번째, 두 번째 상황과 비교하여 세 번째는 접촉된 소선이 혼촉과 동시에 아크가 발생하였으나 도체가 용융되면서 극간 접촉이 차단되어 퓨즈 허용수치에 도달하지 않은 것으로 사료된다. 또한 소선 일부가 용융되어 전선 전체의 단면적이 감소되어도 퓨즈가 용단되지 않고 통전상태가 유지되는 것을 확인 하였다.

Fig. 7. The Electric Wire Melted and Was Disconnected

Eq. (1) 같이 저항은 길이에 비례하고 단면적에 반비례하기 때문에 단면적이 감소하면 저항이 커지고 줄열이 증가한다.

$$R = \rho \frac{l}{A} (\Omega) \quad (1)$$

실험과 같이 전선 용융에 의한 단면적 감소 외에도 압착 단자에서 소선 일부 이탈, 볼트 접속부의 조임이 느슨해진 경우, 커넥터의 불완전 체결, 전선의 소선일부 또는 전부가 절단된 상태에서도 접촉면적의 감소로 저항이 증가하고 줄열도 증가하게 된다. Fig. 8은 접촉불량에 의한 발열로 반도체 특성을 가지고 있는 아산화동(Cu_2O)이 증식된 것으로 아산화동이 증식되면 고온부의 저항치가 낮아져 전류가 집중적으로 흐르게 되어 아산화동 증식과 발열은 더욱 증가하게 된다. 금속체의 접촉저항은 통상 0.1Ω 이하이지만 접촉면적 감소, 접촉력 저하 등의 원인으로 산화피막이 형성되면 접촉저항은 더욱 증가하고 약 10A 를 초과하는 전류가 흘러 줄열은 더욱 증가하게 되어 발화에 이를 수 있다(KESCO, 2004).

Fig. 8. Cu_2O Growing by Poor Connection

실험결과 주차된 차량에서 발화열원이 될 수 있는 전기적

이상 상태 중 퓨즈의 허용용량 이하의 상태에서는 과전류 보호 장치인 퓨즈가 화재를 완벽하게 예방할 수 없기 때문에 사전 점검을 통해 위험요소를 제거하는 것이 중요하나 복잡하게 연결되어 이는 자동차 전기배선에서 외형상 손상이 없다면 일반적인 검사 방법으로 절연이 손상된 부분을 찾아 내기는 어렵다. 우리나라 자동차 검사 항목 중 화재 관련 검사는 화재발생의 우려가 있는 결함 확인이 주요 육안검사 항목에 있지만 뚜렷한 손상이 있지 않는 이상 결함을 찾아내기는 어렵다. 전기적 이상상태가 화재로 진전되기 위해서는 발열이 지속되는 상황에서 발생하므로 Yu and Kim (2011)의 열화상분석을 이용한 전력시스템의 안전진단과 같이 차량 검사 시에도 Fig. 9와 같이 육안 검사와 병행하여 발열부를 추적할 수 있는 열화상 진단이 함께 이루어져야 할 것이다.

Fig. 9. Thermography Diagnosis

5. 결 론

본 연구는 퓨즈 테스트와 차량 화재사례를 유형별로 분석하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 절연피복 손상으로 인하여 노출된 도체가 차체에 혼촉되거나, 외력 등에 의하여 연선의 소선 일부 또는 전부가 절단된 상태에서 진동 등에 의하여 절단부가 붙었다 떨어지면서 발생하는 아크는 순간전류가 자동차에서 일반적으로 많이 사용되는 15~30A 퓨즈의 허용용량 200%에 육박하거나 초과하여 회로가 즉시 차단되어 화재로 발전되기 어렵다.
- (2) 접속부품에서 이탈된 연선의 소선이 차체와 혼촉되면 순간 전류가 퓨즈 허용용량의 135% 육박하였으나 퓨즈는 용단되지 않았다. 또한 혼촉된 소선이 용융되어 전체적으로 전선의 단면적이 감소하게 되고 국부적 저항증가로 발열이 발생하여도 전선의 단면적 감소는 과전류 상태가 아니므로 퓨즈는 용단되지 않았다.
- (3) 현행 자동차 검사방법 만으로는 전선의 단면적 감소, 접촉 불량 등의 전기적 이상상태를 확인하는데 한계가 있으므로 화재로 진전될 수 있는 전기적 발열 부분을

확인할 수 있는 열화상 진단법이 자동차 검사 항목에 포함되어야 할 것이다.

References

- Choi, H.H., and Lee, E.P. (2019). Analysis of a fire in a parked camping car. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 19, No. 1. pp. 217-223.
- Kang, S.D., Kim, J.H., Choi, J.P., and Kim, J.H. (2017). A study on the fire risk of black box wiring in motor vehicle. *Journal of the Korea Society of Safety*, Vol. 32, No. 6, pp. 22-28.
- Korea Electrical Safety Corporation (KESCO). (2004). *Electrical equipment foundation and safety management (Training of fire investigation specialists of the National Police Agency)*. KESCO Electric

Safety Education Institute, Educational materials. pp. 379-380.

- Park, N.K., Lee, D.K., Cho, Y.J., Moon, B.S., and Song, J.Y. (2019). Analysis on the fire accidents vehicles caused by faults in the same anti-lock brake system (ABS) of the same manufacturer. *Fire Science and Engineering*, Vol. 33, No. 3, pp. 121-127.
- Yu, B.Y., and Kim, C.O. (2011). A study on the safety diagnosis for electric power systems using thermal imaging analysis. *Journal of the Korea Society of Safety*, Vol. 26, No. 2, pp. 26-31.

Received	October 11, 2019
Revised	October 16, 2019
Accepted	October 29, 2019