

주행 데이터 분석을 통한 수소버스 운행안전 모니터링 기법 연구

이현미* · 이인식* · 이용주** · 장정아**,[†] · 김시우*** · 심소정****

Study of Hydrogen Bus Operational Safety Monitoring Method through Driving Data Analysis

Hyunmi Lee^{*}, Insik Lee^{*}, Yongju Yi^{**}, Jeong-Ah Jang^{**,[†]}, Siwoo Kim^{***}, Sojung Sim^{****}

Key Words: Hydrogen-electric bus(수소전기버스), Hydrogen leakage(수소누출), Driving data(운행데이터), Safety driving monitoring(안전 모니터링), Pseudo Fuel Leakage(대체누출지수)

ABSTRACT

The adoption of hydrogen-powered Elec is expanding globally. Hydrogen is recognized as a potentially hazardous energy source, and safety assessment is crucial for the development of plans to supply hydrogen-powered electric buses. Hydrogen gas leakage can have a significant impact during bus operations, and continuous hydrogen leakage in hydrogen-powered vehicles can result in fatal accidents. In this study, information about hydrogen leakage is collected through sensors installed within the vehicles and is measured when the sensor detects a leak. The study also proposes the use of Pseudo Fuel Leakage (PFL, %) as an additional indicator for evaluating and monitoring hydrogen safety and leakage.

1. 서론

2021년 파리협정에서 대한민국은 2030년까지 온실가스 배출량을 2018년 대비 40% 감축하는 것을 감축목표(Nationally Determined Contribution, NCD)로 제시하고 새로운 온실가스 감축 체제를 시작했다. 이에 따라 올해 4월 정부는 첫 공식 ‘탄소중립 계획’을 발표하였으며, 무공해차 보급 가속화 및 모빌리티 전반에 대한 친환경화 추진으로 수소와 전기차량의 보급률을 2050년까지 85%~97% 늘리겠다는 계획을 밝힌 바 있다.⁽¹⁾

올해 7월 환경부가 발표한 2022년 국가 온실가스 잠정 배출량은 전년보다 3.5%(2360만 톤) 감소한 6억5천450만 톤으로 집계된 것으로 나타났으며,⁽²⁾ 이는 2018년 대비 10%(7250만 톤) 감소한 수치로 현 정부의 에너지 정책 변화와 무공해차 보급 확대 등으로 인한 에너지 다소비 업종의 온실가스 배출량 감소를 원인으로 꼽을 수 있다. 이러한 한국 정부의 무공해차 전환 가속화를 위한 친환경 차량 도입은 중장기적인 국가 온실가스 감축목표 달성을 위한 실질적 감축량에 성과가 나타날 것으로 기대되고 있다.

국내 각 지자체에서도 친환경 대중교통을 추가 도입 계획을 발표하며 탄소 중립 도시 조성에 대한 의지를 표명하고 있다. 서울특별시는 2022년에 30대의 수소 버스를 도입하고, 2023년에는 추가 100대의 버스를 도입할 계획을 발표하였고, 경상남도도는 2022년부터 2025년까지 매년 100대 이상의 수소 연료 전기 버스 공급을 촉진하기 위한

* 아주대학교 교통시스템공학과, 박사과정

** TOD 지속가능교통연구센터, 연구교수

*** 한국교통안전공단 자동차안전연구원, 자율주행연구처장

**** 한국교통안전공단 자동차안전연구원, 연구위원
E-mail: hm0625@ajou.ac.kr

사업 협정을 수소버스 제작사와 체결하였다.

수소 전기 버스와 같은 친환경 대중교통 수단의 도입으로 도시 교통을 깨끗하고 조용하게 만들 것이라는 국민들의 기대와 함께 한국 정부의 친환경 차량의 보급 확대가 빠르게 진행되는 만큼 수소버스의 안전성 확보는 필수적이다. 수소는 자체적으로 위험성을 가지고 있는 물질로 인식되며 차량의 충돌 또는 전복시에 수소 누출로 인한 심각한 사고 발생에 대한 우려가 존재한다. 이에 2020년 5월부터 수소버스 운행시 안전성 평가기술 및 장비개발과 안전기준 제·개정을 위한 연구가 진행되어 왔다.

이인식 등(2021)은 버스 사고의 심각도에 영향요인을 도출하고 충돌지점 수, 충돌각도에 따라 사고 심각도에 유의한 차이⁽³⁾를 보여 충돌에 따른 수소버스의 안전도 평가의 중요성을 제시하였으며, 김경진 등(2021)은 수소저장시스템이 버스 하부에 장착되는 경우 측면충돌 시 충격발생으로 수소저장시스템의 파손이 발생할 수 있어 측면 충돌의 안전도 평가가 중요하다고 언급했다.⁽⁴⁾ 또한 김경진 등(2022)은 수소버스 수소저장시스템 단위의 안전성을 평가방법을 개발하여⁽⁵⁾ 실차 충돌시험으로 요구되는 비용을 절감할 수 있는 방안을 제시하였다.

이상의 선행연구와 같이 수소버스 및 수소저장시스템의 충돌 안전성을 평가하고 검증하는 기준과 평가 방법에 대한 연구가 진행된 것과는 대조적으로 수소버스 누출 안전성 확보를 위한 연구는 부족한 상태이다.

수소 누출은 수소연료전지 차량에서 안전성 평가가 필요한 중요한 지표.⁽⁶⁻⁸⁾로 버스운행상황에서 수소의 누출이 지속적으로 발생할 경우 치명적인 사고로 이어질 수 있다. 따라서 운행에 따라 발생할 수 있는 수소 누출의 위험상황을 조기 발견하고 사고를 예방하기 위한 지속적인 모니터링이 필요하다.^(9,10) 본 연구에서는 차량 운행과 맞추어 꾸준한 관리 및 확인이 필요한 수소버스의 안전운행 모니터링 지표 및 평가 방법에 대하여 제시한다.

2. 수소 연료 버스의 수소 누출 평가

2.1. 수소 누출 정보

자동차 및 자동차부품의 성능과 기준에 관한 규칙은 수소버스의 운행 중 수소 누출 등에 대한 안전성 평가 방법 및 기준을 규정하고 있다. 자동차 및 자동차부품의 성능과 기준에 관한 규칙 제17조(연료장치)에 따르면 수소 전기 차량은 수소 가스 누출 농도를 기반으로 가스 누출 시 경고등과 차단 밸브가 작동되어야 한다. 수소 농도가 2±1%

를 초과하면 적색 경고등이 켜지며, 3±1%를 초과하면 차단 밸브가 작동해야 한다. 차량 배기가스에서 방출되는 수소 농도는 평균 4%를 초과하거나 순간 최대 8%를 초과해서는 안된다.⁽¹¹⁾

현재 수소전기버스의 수소 누출 정보는 차량에 부착된 누출량(%) 측정 센서를 통해 수집되는데⁽¹²⁾ 센서가 부착된 곳에서만 측정되기 때문에 만약 센서가 없는 위치에서 수소 누출이 발생한다면 누출을 감지할 수 없다. 따라서 차량의 어느 곳에서 누출이 발생하느냐에 따라 감지가 되지 않을 위험이 존재한다. 또한, 수소 누출 측정은 실제로 수소가 누출되는 위험사건이 발생하는 경우에만 측정되기 때문에, 누출사고가 발생하기 전까지, 실제 사고가 발생하지 않는 실도로서 차량의 전반적인 주행상황에 따른 수소정보의 변화에 대해 모니터링 및 평가하는 것은 한계가 존재한다. 수소누출에 관한 정보는 Table 1과 같다.

2.2. 수소 누출 위험 평가를 위한 대체 모니터링 지표

본 연구에서는 센서에서 감지되지 않는 위치에서의 누출 발생을 감지하고 누출사고나 이벤트 발생 전의 누출 위험 발생 가능 상황을 모니터링 하기 위해 사고 발생 사전 방지 차원에서의 평가를 위한 지표로 대체누출지수(Pseudo Fuel Leakage, 이하 PFL)를 제안한다. 대체누출지수는 버스 운행 중에 생성된 발생전력(Output Power)과 비교하여 수소 소비량(Hydrogen Consumption)을 기반으로 식(1)과 같이 산출된다. 일정한 운행상황(정상상

Table 1 Hydrogen leakage sensing

Channel	Hydrogen Leakage (%) Index	Sensing and Detecting Position
FCU1	FuelTank_FuelLeakage	Fuel Tank
	FuelSupplySystem_FuelLeakage	Fuel Supply System
	Stack_FuelLeakage	Stack
FCU2	FuelTank_FuelLeakag	Fuel Tank
	FuelSupplySystem_FuelLeakage	Fuel Supply System
	Stack_FuelLeakage	Stack
HMU1	HydrogenTank1	Hydrogen Tank
	HydrogenTank2	Hydrogen Tank

황)에서의 발생전력 당 소비되는 수소량은 일정한 범위의 값이 나타난다고 가정한다. 이때 같은 운행상황에서 발생전력당 수소 소비량이 이유없이 높게 나타나는 경우를 이벤트 발생으로 정의한다. 이벤트 발생 후 정상상황으로 되돌아 오지않고 이벤트 발생 상황이 지속되는 경우를 연료누출의 위험으로 정의한다.

$$Pseudo\ Fuel\ Leakage = \frac{Hydrogen\ Consumption}{Stack\ Output\ Power} * 100 \quad (1)$$

즉 발전된 전력(1 kW) 당 연료 소비량이 과도하게 높을 경우, 이는 누출 가능성을 동반한 위험한 사건의 발생으로 간주된다. 해당 위험 사건 발생 후 연료 소비량이 정상으로 돌아오지 않고 지속적으로 높게 유지될 경우, 이는 누출 위험 발생으로 볼 수 있다.

3. 데이터 수집 및 기술 통계

실도로 운행 데이터 수집을 위해 ‘수소 시내버스 시범 사업 도시’로 선정된 경상남도 창원시의 수소 전기 버스 4대에 DTG(Digital Tacho Graph) 및 VCU(Vehicle Control Unit)를 장착하였다. 현재 총 28대의 수소버스가 시내를 운행되고 있다. 총 5개월간(2021년 9월~2022년 2월) 4대의 수소버스에서 약 20만 개의 초단위 운행 데이터를 수집 모듈을 통해 수집했다. 차량이 운행한 노선의 정보는 Table 2와 같다.

데이터 분석과 개발한 지표의 적용을 위해 3707번 버스의 일일 운행 데이터와 노선의 단방향 1회 운행데이터를 샘플로 추출하였으며, 각각의 차량 속도의 분포는 Fig. 1과 같이 나타났다. 이 버스는 하루 평균 34.5 km/h의 속

도로 운행하며, 최고 속도는 시속 71.5 km/h로 나타났다. 1회 단방향 기준, 평균 30.6 km/h의 속도로 운행하며, 최고 속도는 시속 71.57 km/h로 나타났다.

운전자의 운전습관을 급가속과 급감속의 발생 횟수로 나타낸 결과는 Fig. 2와 같다. 가속도는 차량속도를 기반으로 산출하였고, 급가속과 급감속은 교통안전공단의 안전운전평가기준을 통해 평가하였다.⁽¹³⁾ 3707번 차량은 하루 동안 노선을 운행하며 861회(1.6%)의 급가속과 340회(0.6%)의 급감속이 발생한 것으로 나타났으며, 1회 운

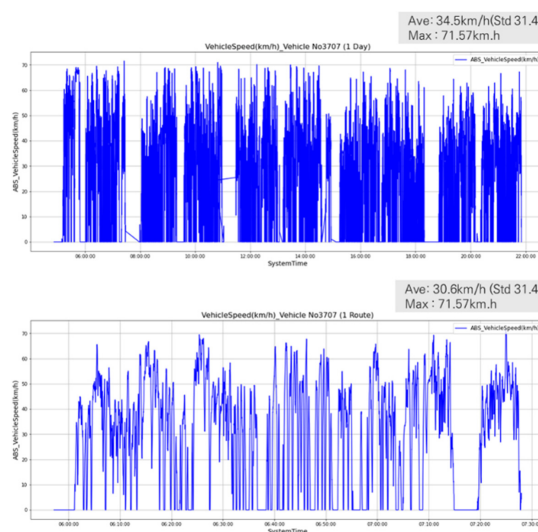


Fig. 1 Distribution of vehicle speed

Table 2 Bus route information

Information	Route Line No.27
Arrival time	23:59:00
Departure time	12:24:00
Route curvature	1.84907
Route length(km)	56.3311
Spacing of bus stops	0.356526
Origin	Gapo high school
Destination	Buk-myeon
Number of Bus-stops	158
Shortest Distance	30.4645
Travel time	158

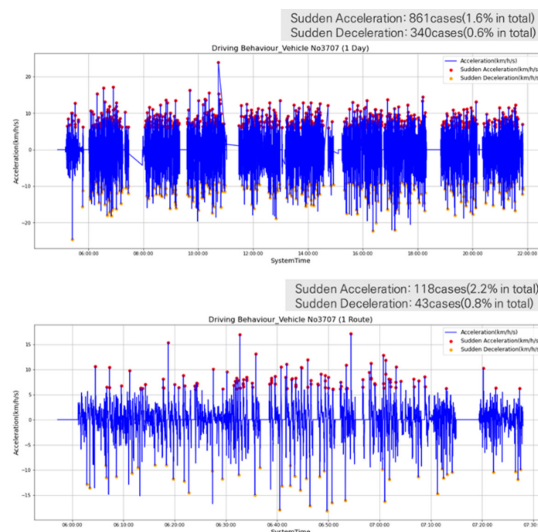


Fig. 2 Distribution of vehicle acceleration

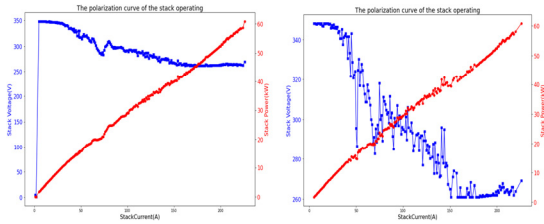


Fig. 3 The polarization curve of the stack operating

행 시 118회(2.2%)의 급가속과 43회(0.8%)의 급감속이 발생한 것으로 나타났다.

스택의 발생전력(Stack Output Power)은 전류(A)와 전압(V)을 통해 계산되었으며, Fig. 3과 같이 스택의 전류와 전압은 역의 관계로 전류와 전압이 증가함에 따라 출력전력이 증가하는 것을 확인하였다.

$$Output\ Power(kW) = Stack\ Current \times Stack\ Voltage \quad (2)$$

4. 대체 수소누출 모니터링 지표 적용

본 연구에서는 수소 누출안전성 평가를 위한 지표로 제

안한 대체누출지수를 실제로 운행 데이터를 기반으로 적용성을 확인하고 누출 안전성 평가 및 모니터링 방안을 제시한다.

4.1. 일단위, 회차별 대체 수소누출지수 변화

속도에 따른 대체누출지수의 변화는 Fig. 4와 같이 나타났다으며 하루 운행 시 속도에 따라 소비율이 작아지는 경향성이 나타났고, 1회 운행시 속도에 따라 대체누출지수는 눈에 띄는 경향성이 보이지 않았다.

가속도에 따른 대체누출지수의 변화는 Fig. 5와 같이 나타났으며 하루 운행 시 감속의 경우 가속 상황보다 소비율이 높게 나타나는 이벤트가 발생하는 것으로 유의하게 나타났고($p < .05$), 1회 운행 시에도 감속의 경우 이벤트가 많이 발생한 것으로 나타났지만 통계적으로는 유의한 차이가 나타나지 않았다.

4.2. 평가 및 분석 방안

대체누출지수(%)의 분포는 Fig. 6과 같이 나타났다. 일일 대체누출지수(%)를 우리나라 자동차 및 자동차부품

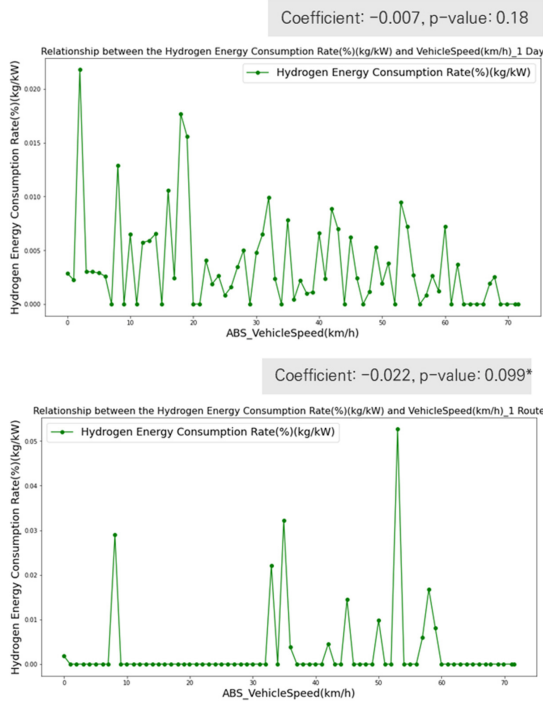


Fig. 4 Change in PFL(%) with speed

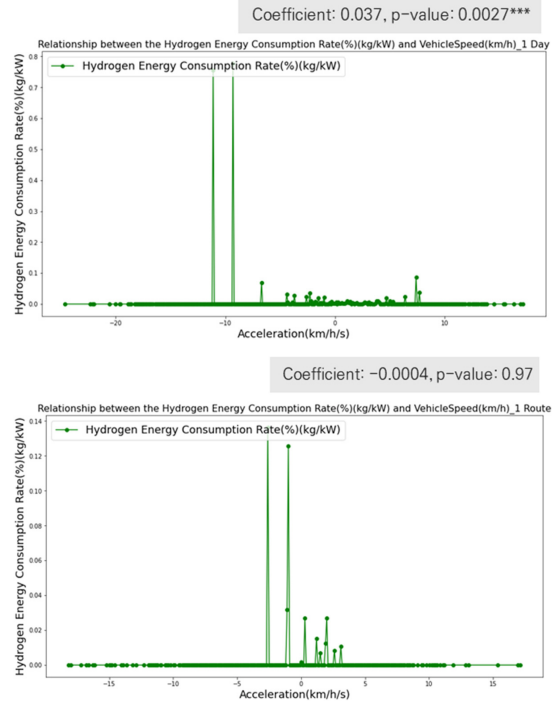


Fig. 5 Change in PFL(%) with acceleration

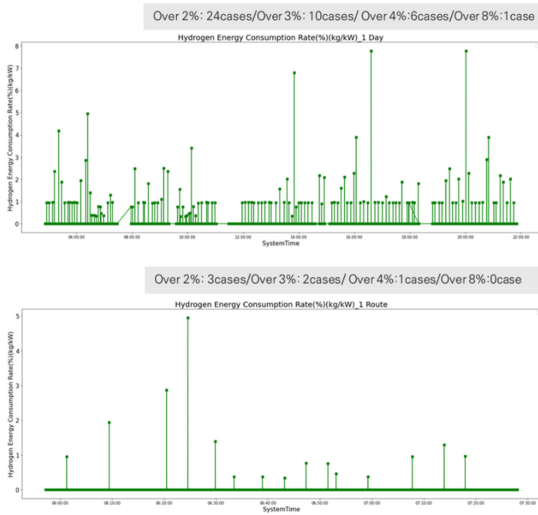


Fig. 6 Distribution of PFL(%)

의 성능과 기준에 관한 규칙 제17조(연료장치)에 적용하면 2% 이상의 대체누출지수(%) 값이 발생할 때 경고가 필요한 상황으로 평가할 수 있다.

이와 같은 방법으로 국내 기준에 적용해 보았을 때 하루 운행 시 대체누출지수가 2% 이상 발생 24건, 3% 이상 10건, 4% 이상 6건, 8% 이상 1건으로 나타났고, 1회 운행 시 2% 이상 3건, 3% 이상 2건, 4% 이상 1건, 8% 이상 발생하지 않은 것으로 나타났다. 두 그래프 모두 이벤트가 발생하고 지속되지 않으며 빠르게 정상상황으로 돌아온 것으로 확인되었다.

5. 분석결과

본 연구에서는 대체누출지수의 적용성을 확인하기 위해 두 가지 분석을 수행하였다. 첫째, 27번 노선의 곡물도에 따른 대체누출지수의 변화를 분석하기 위해 노선을 클러스터링한 후 링크별 대체누출지수의 차이를 확인하였다. 둘째, 운전자의 운전 행동에 따른 대체누출지수의 변화를 분석하기 위해 급가속과 급감속을 나쁜운전행동으로 분류하고 정상운전과 비교하여 대체누출지수의 차이를 분석하였다.

5.1. 운행노선에 따른 대체누출지수

운행노선의 위치와 곡물 특성을 고려하여 K-mean clustering 분석한 결과 Fig. 7과 같이 네 개의 링크로 노

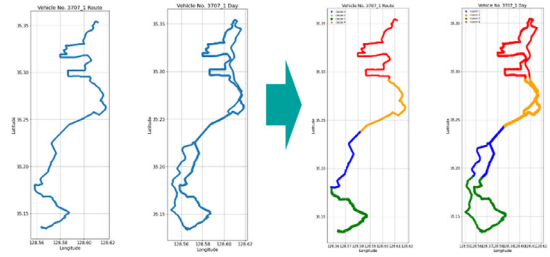


Fig. 7 Result of route clustering

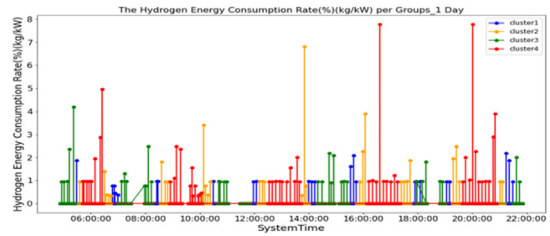


Fig. 8 The PFL(%) per cluster link

선이 군집되었다. 빨간색 링크는 곡물이 가장 심한 링크로 클러스터링 되었고, 초록색 링크는 노선 회차시 굴곡도가 나타나는 것으로 확인된다. 파란색과 노란색 링크는 비교적 굴곡도가 적은 것으로 확인된다. Fig. 8은 군집된 링크별 대체누출지수(%)의 차이를 나타내며 회차를 하고 굴곡도가 가장 높은 빨간색 링크에서 대체누출지수가 가장 높게 발생한 것을 확인하였다.

군집된 네 개의 링크별 대체누출지수의 차이를 ANOVA 분석한 결과는 Table 3과 같다. 네 개 링크의 등분산 가정이 만족되었으며(p=0.33), 사후 검정 결과, 클러스터에 따라 대체누출지수의 유의한 차이가 나타났다. 가장 뚜렷

Table 3 ANOVA of difference in PFL(%) by route cluster

Route clustering	N	PFL(%)	F(p-value)	Scheffe Post Hoc tests
A. Cluster1	15,874	0.0 ± 0.01	1255800.14*** (.000)	A<B, D A=C C<B,D C<D
B. Cluster2	10,796	1.2 ± 0.52		
C. Cluster3	12,827	0.0 ± 0.01		
D. Cluster4	14,025	5.3 ± 1.83		
Total	53,522	0.6 ± 0.09		

*p<.10, **p<.05, ***p<.01

한 곡물을 보이는 빨간색 링크(Cluster 4)는 가장 높은 값(5.3%)이 나타났다. 이어서 노란색 링크(Cluster 2)는 1.2%로 나타났고, 굴곡도가 낮은 파란색 링크(Cluster 1)와 회차 시 굴곡도가 나타나는 녹색 링크(Cluster 3)는 상대적으로 낮은 값들을 보였으며, 사후 분석에서 이 두 클러스터 간에는 유의한 차이가 발견되지 않았다. 이는 곡물이 대체누출지수에 영향을 미치는 동시에 다른 영향요인들도 있음을 의미한다.

5.2. 운전행동에 따른 대체누출지수(%)

1일 운전 데이터를 기반으로 운전 행동에 따른 대체누출지수의 차이를 분석하였다. 운전자의 운전 행동에 따른 대체누출지수 차이를 분석하기 위해 급가속 및 급감속을 나쁜 운전 행동으로 정의하였다. 6 km/h 속도에서 초당 6 km/h 이상의 가속이 발생했을 때 급가속으로, 6 km/h 속도에서 초당 9 km/h 이상의 감속이 발생했을 때 급감속으로 분류하였다. 정상운전행동과 나쁜운전행동의 대체누출지수 차이를 평균 비교한 결과는 Table 4와 같으며, 운전 행동에 따라 평균 대체누출지수가 유의하게 차이가 나

Table 4 t-test of difference in PFL(%) by driving behaviour

Driving behaviour	N	PFL(%)	t statistic	p-value
Bad driving	1,201	0.116 ± 3.919	1.989**	.047
Normal driving	37,670	0.005 ± 0.166		
Total	38,871	0.012 ± 0.876		

*p<.10, **p<.05, ***p<.01

Table 5 The monthly PFL(%) exceedance rate(%)

Category		The monthly hydrogen leakage index exceedance rate(%)			
		OCT	DEC	JAN	FEB
> 2%	N	326	2675	2568	141
	%	0.0660	0.1935	0.1949	0.0579
> 3%	N	265	2410	2351	63
	%	0.0537	0.1743	0.1785	0.0259
> 4%	N	233	2312	2264	38
	%	0.0472	0.1673	0.1719	0.0156
> 8%	N	132	2002	1969	13
	%	0.0267	0.1448	0.1495	0.0053
Total number of data		493,714	1,382,364	1,317,307	243,361

타난 것을 확인하였다. 운전자가 급가속 또는 급감속 운전 행동을 보일 때, 대체누출지수값은 정상운전할 때보다 높았으며, 이는 나쁜 운전 행동 시 대체누출지수가 더 높다는 것을 의미한다.

기존 기준에 적용하여 대체누출지수(%)가 기준을 초과한 위험 발생 건수를 월별 집계한 결과는 Table 5와 같다. 대체누출지수 기준 초과 월별 발생률은 0.2% 미만이며, 발생 후 모두 정상상황으로 빠르게 돌아왔고 연속이벤트 발생 건은 나타나지 않았다.

6. 결론

수소버스의 운행상황에서 누출위험을 모니터링 및 평가하기 위한 대체누출지수를 통해 실제로 누출 위험사고가 발생하지 않은 운행 상황에서 전반적인 수소 소비량의 변화를 분석하고 수소 누출위험 가능성 판단에 활용할 수 있음을 확인하였다. 첫째, 자동차 안전기준을 적용함으로써 경보 상황의 존재 여부를 판단할 수 있다. 누출이벤트가 규정에 따라 기준을 초과해 발생 직후 정상상태로 돌아가지 않고 지속되면 위험상황으로 감지되어 실제 수소 누출여부를 확인하는 등의 활동을 통해 사고를 예방할 수 있다. 둘째, 경로의 심각도나 굴곡도가 높을 때 대체수소 누출지수가 높은 값으로 나타났으며, 급감속이나 급가속 등의 운전행동의 경우 지표값이 정상운전보다 높게 나타났다. 운행노선의 곡물(가혹성)과 운전자의 나쁜운전행동은 대체누출지수에 유의한 영향을 주며, 기존 수소누출 기준을 적용했을 때 월별 발생률은 0.2% 미만이며 발생 후 모두 정상상황으로 빠르게 돌아왔고 연속이벤트 발생 건은 나타나지 않았다.

수소버스 도입 및 보급 시기에 따라 현재까지 수집된 데이터의 정보에 한계가 있다. 분석 결과를 기반으로 지속적으로 모니터링한 데이터와 차량 상태(노후정도)에 데이터가 추후 수집될 경우 운행기간에 따른 차량 상태의 모니터링이 가능할 것으로 사료된다. 향후 연구에서는 대체누출지수에 적합한 이상치 탐지 방법 및 임계값을 선정하여 기준 수립의 필요성을 제안하고, 현재 위험발생이 연속적으로 발생하는 상황이 없는 만큼 반복되는 이벤트 발생에 대한 학습 및 모니터링 방법에 대한 연구가 필요하다.

참고문헌

- (1) 환경부, 2023, 탄소중립·녹색성장 국가전략 및 제1

- 차 국가 기본계획.
- (2) 환경부, 2023, 2022년 국가 온실가스 잠정배출량 발표, 전년 대비 3.5% 감소.
 - (3) 이인식, 이현미, 장정아, 이용주, 2021, “K-평균 군집모형 및 순서형 로짓모형을 이용한 버스 사고 심각도 유형 분석 측면부 사고를 중심으로,” 자동차안전학회지, 제13권, 제3호, pp. 69~77.
 - (4) 김경진, 신재호, 한경희, 인정민, 심소정, 김시우, 2021, “수소버스 측면충돌 시험방법 연구,” 자동차안전학회지, 제13권, 제4호, pp. 92~98.
 - (5) 김경진, 신재호, 한경희, 인정민, 김시우, 2022, “수소버스 수소저장용기의 측면충돌 안전성 평가방법 연구,” 자동차안전학회지, 제14권, 제4호, pp. 113~119.
 - (6) Y. Najjar and S. Mashareh, “Hydrogen Leakage Sensing and Control: (Review),” in IEEE Access, pp. 16228–16240, October 2019, DOI: 10.26717/BJSTR.2019.21.003670.
 - (7) D. Hao, X. Wang, Y. Zhang, R. Wang, G. Chen, and J. Li, “Experimental Study on Hydrogen Leakage and Emission of Fuel Cell Vehicles in Confined Spaces,” Automotive Innovation, Vol. 3, No. 2, pp. 111~122, May 2020.
 - (8) Y. Shen, T. Zheng, H. Lv, W. Zhou, and C. Zhang, “Numerical Simulation of Hydrogen Leakage from Fuel Cell Vehicle in an Outdoor Parking Garage,” World Electr. Veh. J., Vol. 12, No. 3, pp. 118~128, August 2021.
 - (9) P. Jyothi and G. Harish, “Design and implementation of real time vehicle monitoring, tracking and controlling system,” 2016 International Conference on Communication and Electronics Systems (ICCES), 2016, pp. 1~4, doi: 10.1109/CESYS.2016.7889814
 - (10) H. Hu and L. Fang, “Design and Implementation of Vehicle Monitoring System Based on GPS/GSM/GIS,” 2009 Third International Symposium on Intelligent Information Technology Application, 2009, pp. 278–281, doi: 10.1109/IITA.2009.411.
 - (11) 국토교통부, 2021, “측면충돌 시 승객보호 기준(제102조제1항 관련),” 자동차 및 자동차부품의 성능과 기준에 관한 규칙 [별표 14의2].
 - (12) Y. Yi, J. Jang, and I. Lee, “Data Design for Driving Monitoring of Hydrogen Electric Bus,” in IEEE Access, pp. 697~700, October 2021, doi: 10.1109/ICTC52510.2021.9621036.10.1109/CESYS.2016.7889814.
 - (13) 국토교통부, 2017, 사업용차량 통합단말표준플랫폼 및 안전운전지원기술개발 최종보고서.