

수소연료전지 철도차량 운영 시 고려사항 고찰

A Study on the Considerations for the Operation of Hydrogen Fuel Cell Rolling Stock

임성민*, 성순욱*, 소진섭*, 김진우*

Sung-Min Lim*, Soon-Wook Sung*, Jin-Sub So*, Jin-Woo Kim*

초 록 : 국제적으로 탄소 배출 규제가 강화되고 국내에서는 미세먼지 문제에 대한 해결책에 대한 고민이 깊어지는 가운데 정부에서는 수소 연료전지를 활용하는 수소경제가 대두되고 있다. 그 중심에는 수소전기차가 있으며 수소열차에 대해서도 언급되고 있다. 실제로 해외에서는 2018년 9월부터 수소열차가 운행이 되고 있는 상황이다. 하지만 수소열차는 기존의 디젤열차 혹은 전동차와 비교하여 그 동력장치가 현저하게 다르며 요구되는 인프라와 운영 시 고려해야 할 사항 또한 다르다. 따라서 본 연구에서는 수소 연료전지 철도차량을 운영하게 될 경우 고려해야 할 수소 연료의 특성 및 공급 방법과 인프라, 그리고 마주하게 될 위험 요인 중 특히 화재 및 폭발 위험 요인과 그 위험 관리 방안에 대하여 고찰해 본다.

주요어 : 미세먼지, 수소, 수소열차, 연료전지, 위험요인, 수소충전소

1. 서 론

2015년 12월 파리협정(Paris Agreement) 발효로 인해 저탄소 경제로의 이행이 강제되고 세계적으로 온실가스 배출에 대하여 연구가 활발해졌다. 우리나라 역시 미세먼지 문제에 직접적으로 영향을 받으면서 국민적 관심이 커졌다. 그 대책 중 하나로 배출가스가 전혀 없고 발전과정에서 미세먼지를 저감시키는 기능을 하는 수소 연료전지를 활용한 수소경제가 대두되고 있다. 연료전지의 연료로 사용되는 수소는 여러 형태로의 에너지 변환이 용이한 특징을 가지고 있으며 고효율, 무공해의 특징을 가지고 있기 때문에 지속가능한 에너지 패러다임에 유리한 조건을 가지고 있다.

그 중심에 수소전기차(NEXO)가 있으며 철도 분야의 수소열차 역시 언급되고 있다.^[1] 해외에서는 ALSTOM社에서 개발한 수소열차(Coradia iLint)가 2018년 9월을 기점으로 독일 니더작센주(Niedersachsen)에서 운영을 시작했으며 독일뿐만 아니라 영국, 프랑스 등에서도 수소열차의 도입 계획을 가지고 있다.^[2] 하지만 수소열차는 기존의 디젤열차

혹은 전동차와 비교하여 그 동력장치가 현저하게 다르며 연료의 특성 또한 다르며 요구되는 사항 또한 다르다. 특히 고압 인화성 가스를 연료로 사용함으로써 인하여 발생하는 화재 등의 위험과 안전에 대하여 고려하지 않을 수 없다. 수소가스는 폭발범위가 넓고 폭발 화염 전파속도가 매우 빠른 가연성 가스로서 누출, 확산, 점화 및 폭발의 위험성이 높아 철저한 안전성 확보가 필요하다.

따라서 본 연구에서는 수소 연료전지 철도차량을 운영하게 될 경우 고려해야 할 수소 연료전지와 수소 연료의 특성 및 공급 방법, 인프라에 대해 알아보고 마주하게 될 위험 요인 중 화재 및 폭발 위험 요인 그리고 그 위험 관리 방안에 대하여 중점적으로 고찰해 본다.

* 한국철도공사 연구원 기술연구처

2. 본 론

2.1 수소 공급 및 충전 인프라

수소 연료전지 철도차량은 기존의 열차에서 사용하지 않았던 수소를 주 연료로 사용하기 때문에 수소의 공급과 충전 인프라를 고려해야 한다.

수소의 생산 방법은 현재까지 20여가지가 넘게 알려져 있지만 가장 경제적이고 많이 활용되고 있는 방법은 원유 개질과 부생수소이다.^[3] 하지만 다른 수소 생산방법에 비하여 상대적으로 경제적인 것 가솔린, 디젤 등 다른 연료에 비해서는 상당히 비싼 편이다. 현재는 정부에서 지원사업을 통해 가격을 조율하고 있지만 지원은 한정적이다. 또한 원유 개질과 부생수소의 수소생산 방법의 경우 그 생산과정에서 배출가스가 발생하기 때문에 궁극적인 친환경으로 이야기하기에는 어려움이 있다. 그렇기 때문에 수소 연료가 경쟁력을 가지기 위해서는 더욱 경제적이며 친환경적인 수소 생산 방법이 요구된다.



Fig. 1 수소의 생산 방법^[3]

수소는 공기보다 가볍고 확산성이 뛰어나기 때문에 생산뿐만 아니라 운송과 보관에 있어서도 어려움이 따른다. 그렇기 때문에 수소 생산 지역과의 거리에 따라 수소의 가격이 달리 책정된다. 이 문제를 해결하기 위하여 액화수소, 수소저장물질(합금) 등이 연구되고 있다.^[2] 하지만 구축비용과 효율, 안정성 측면에서 바로 적용하기는 어려우며 추가적인 연구가 필요한 상황이다.

수소 충전 인프라의 경우 현재 고압가스 기

준법에 의하면 안전을 위해 레일에서의 이격 거리가 요구된다. 하지만 앞서 언급한 바와 같이 차량과 충전설비의 거리가 멀어지면 멀어질수록 수소 운송의 문제로 인한 손실이 우려된다. 이를 해결하기 위하여 안전을 확보한 상황에서 이격거리를 최소화 하는 특별법을 적용하거나 이동식 수소충전소를 적용하는 등의 문제해결 방법을 고려해야 한다. 또한 승용차와 다르게 열차는 정기적으로 지속적인 운영을 하는 수송수단이기 때문에 주행거리에 따라 적절한 위치에 수소 충전소를 구축하여야 하며 승용차의 몇 배에 이르는 대용량의 수소를 빠른 시간에 충전 할 수 있는 설비가 이루어져야 한다. 또한 열차의 운행편성에 따라 한 곳에서 동시에 여러 열차를 충전하는 것도 고려하여야 한다.

2.2 위험요인 및 위험관리

수소연료전지 철도차량을 운영할 경우의 위험요인은 일반적인 철도차량의 위험요인을 포함한다. 그리고 내연기관이나 전차선이 없는 대신 연료전지 발전 시스템과 배터리, 전장장치를 사용하기 때문에 연료전지 시스템에서 발생하는 위험요소와 전기적인 위험요인 역시 포함한다. 또한 고압 인화성 기체인 수소를 취급하기 때문에 화재 및 폭발, 저장용기의 파열, 수소가스 노출에 따른 위험이 따른다.

2.2.1 화재 및 폭발 위험요인

연료로 사용되는 수소는 극인화성 가스이자 고압 압축가스로 NFPA위험등급(0~4) 분류상 보건-1, 화재-4의 유해성·위험성 등급을 가진다.^[4] 화재 및 폭발의 위험요인으로 그 특성을 파악해 보면 점화에너지가 낮은 극인화성 물질로서 다른 인화성 물질보다 광범위한 연소범위를 가진다. 또한 공기보다 가벼우며 확산성이 매우 높기 때문에 화재 발생시 급격하게 연소되어 불기둥을 이루는 제트화재(Jet Fire)현상이 발생 될 수 있다. 이 경우 누출 압력으로 인하여 화염이 굉장한 운동량을 가지며 화재의 직경은 작으나 길이는 풀화재(Pool Fire)보다 길게 형성된다.^{[5][6]} 화

재 그 자체로도 위험성을 가지고 있을 뿐만 아니라 연료전지 스택, 전장장치 등의 각 부대설비의 오작동을 유발시켜 도미노 현상에 의한 대형사고가 발생하는 원인이 될 수 있다. 가열 시에는 폭발의 위험이 있으며 공기 중 수소의 부피농도가 4~75% 사이에서 폭발 분위기를 형성한다.^{[7][8]}

점화원은 첫째, 정비과정에서 발생할 수 있는 용접, 연소, 분쇄, 기계 충돌 등으로부터 발생하는 직접적인 불꽃이 될 수 있다. 둘째, 불완전한 접지 또는 비전도성 배관으로부터의 정전기와 모터, 스위치, 계전기의 전기 불꽃이 원인이 될 수 있다. 셋째, 철도차량이 레일 위를 달리면서 발생하는 마찰열, 장치의 작동에 의한 기계열 역시 점화원이 될 수 있다. 마지막으로 승객이 가지고 있는 점화원 요소의 가능성이 있다. 흡연을 위한 라이터 등의 직접적인 점화원뿐만 아니라 핸드폰 등의 전자장치에 의한 전기적 불꽃이 발생할 수도 있음을 고려하여야 한다.

그 밖에 고압가스를 사용하기 때문에 압력에 의한 위험을 고려하여야 한다. 특히 연료탱크 용기 파손에 의한 폭발 및 누기, 화재 위험이 있는 만큼 과열, 가압, 기밀, 충격, 화재 등에 대하여 수소탱크의 안전시험이 철저히 이루어지고 관리되어야 한다.

2.2.2 화재 및 폭발 위험관리

수소 연료의 화재 및 폭발의 위험을 관리하는 방법으로는 폭발 분위기 형성 방지, 점화원 제거, 이격거리 관리 등이 있다.^{[7][8]}

폭발 분위기 형성 방지 방법으로는 봉쇄, 격리 및 분리, 환기 등의 방법을 사용할 수 있다.

봉쇄를 통한 폭발 분위기 형성 방지 방법을 검토해보면 수소 열차 내에서의 수소 이동 경로를 관리해야 한다. 수소탱크와 연료전지 시스템 그리고 그것을 연결하는 배관과 연결장치가 기준에 부합하는지 확인하고 연결장치와 배관은 그 길이와 크기를 최소화하고 이음매(Joint) 수를 최소화 한다. 그리고 연결장치의 교체 빈도를 최소화하고 접합 배관은 용착 연결(용접 등) 또는 플랜지/나사니를 이용하여 연결하여 누출의 위험을 최소화

한다. 수소의 공급 및 운송을 위해서는 원통형 용기의 교체가 유리할 수 있으나 봉쇄를 통한 폭발 분위기 형성 방지를 위해서는 재충전이 가능한 고정형 저장용기의 사용이 더욱 안전하다. 수소 열차의 충전 후 운행 전 수소 누출 여부 시험이 필수적이며 정기적으로 적절한 검사와 유지관리를 시행하고 결과를 문서화해야 한다. 수소 연료전지 구동시스템은 기존의 철도 구동시스템과 다르기 때문에 수소 및 유지보수 관리를 위하여 수소가스 전문가와 연료전지 엔지니어가 요구된다. 또한 연료전지 시스템 내부에서 발생할 수 있는 기계적 결함에 의한 문제를 대비하여 릴리프 시스템을 갖추어야 한다.

격리 및 분리를 통한 폭발 분위기 형성 방지 방법은 예측 가능한 점화원으로부터 수소취급장치를 분리시키고 물리적으로 격리시키는 것이다. 기본적으로 수소탱크와 연료전지의 전기 출력장치를 격리시키는 것을 기본으로 수소가 누출할 수 있는 수소 측정 장치에 잠재적 점화원, 전기장치를 배제한다. 또한 수소는 공기보다 가벼워 누출 시 위로 축적이 되므로 점화원보다 높은 위치에 수소저장장치를 배치하는 것을 고려할 수 있다. 그리고 점화원을 격리시켜 수소유입을 방지한다.

환기는 폭발 분위기 형성을 방지하는데 용이한 방법 중에 하나이다. 공기보다 가볍고 확산성이 매우 높기 때문에 환기만 잘하더라도 빠르게 공기 중으로 흩어져 폭발 분위기 형성 가능성을 크게 줄일 수 있다. 반대로 불침투성 천장과 덮개 등으로 밀폐된다면 누출 시 급격하게 폭발분위기가 형성될 수 있기 때문에 주의하여야 한다.^{[7]-[9]} 이를 방지하기 위하여 적절한 위치에 환기 장치가 구축되어야 하고 환기구 근처에는 점화원이 없어야 한다. 자연 환기가 불가능한 경우 강제 환기를 통하여 폭발 분위기 형성을 방지한다. 연료전지 시스템에 존재하는 공기 공급장치와 압축기, 냉각기 등은 효과적인 환기 제공에 용이하다. 수소 누출의 가능성이 있는 연료전지 시스템과 연결부에는 수소가스 누출 감지기를 설치하여 항상 가스의 누출여부를 모니터링 하여야 하며 가스감지기와 시스템이 연동되어 가스감지기가 작동한 경우에는

메인 밸브의 신속한 차단과 동시에 전체 시스템에 대한 신속한 환기가 이루어지도록 해야 한다. 누출된 수소는 폭발하한(LEL) 농도인 4%이하를 유지하여 폭발 범위에 들어가지 않도록 하여야 하며 국부적인 축적을 고려한다면 수소의 LEL 농도의 1/4인 1%를 유지할 수 있도록 하여 안전을 확보하도록 하여야 한다. 만약 수소와 더불어 다른 연료가 존재한다면 환기 설비는 각 물질의 밀도 및 확산성을 고려하여 구비되어야 한다.^{[7]-[11]}

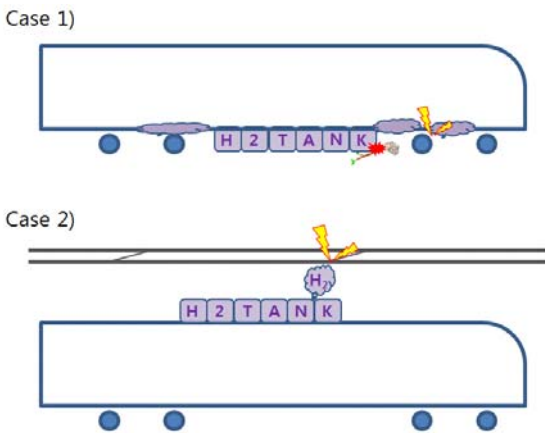


Fig. 2 수소 탱크 위치에 따른 고려사항

수소열차에서 수소의 누출 위험이 가장 높은 수소 탱크의 위치를 위 사항을 고려하면 옥외이자 가장 상부에 위치하는 열차 루프가 적절하다. 하부에 있다면 수소가 열차 사이에 급격하게 모이게 되어 폭발 분위기를 형성할 수 있으며 레일과 바퀴의 마찰, 기타 전장장치 등 모든 요소가 위험요소가 되기 때문이다. 하지만 상부에 위치시킨다고 하더라도 전차선이 존재하는 혼용구간 등의 노선을 운행하게 될 경우 수소탱크 위에 바로 전차선이 위치하게 되므로 누출 시 점화원에 수소를 공급하는 형태가 될 수 있음을 고려하여야 한다.

또한 고압 가스의 사용이 이루어지기 때문에 충전 시 용기가 팽창하며 일정량의 사용이 이루어지면 수축하는 현상을 반복한다. 그렇기 때문에 용기와 용기를 고정하는 프레임 등은 이를 고려하여 설계되어야 파손 등의 위험이 줄어들 것이다.

점화원을 관리하기 위하여 수소탱크와 연료

전지, 배관 등에 대한 특성과악과 위험성평가를 시행하고 관리되어야 하며 구역 구별이 확실해야 하고 적합한 기호로 확실하게 경계를 표기하여야 한다. 위험 지역에는 적합한 장치를 사용하고 정비 시에는 정전기 방지를 위한 접지가 이루어져야 하며 방전복을 착용하여야 한다. 또한 정비 시 흡연 및 핸드폰 사용을 금한다. 객실로 수소 가스가 누출이 되는 일이 없도록 설계하여야 하며 누출 감지 센서를 통한 만일의 사태를 대비한다. 적절한 장소에 피뢰설비를 설치하고 자연재해에 대비한다.

이격거리 관리는 예측 가능한 사고의 영향을 완화시키기 위한 최소거리로서 수소 저장소와 점화원 등의 위험요소간을 이격시키기 위함과 수소 누출로 인한 화재 사고 등에 대한 적절한 방호 수준을 제공하기 위하여 이격거리를 관리한다. 뿐만 아니라 차량 또는 기계장치 충돌, 인화성 물질의 누출, 점화원 또는 외부 화염으로 인한 복사열 영향 등과 같은 사고로부터 설비를 방호하기 위해 계산된 거리이다. 안전한 설비의 설계를 위한 기본적 요구사항이며 가스저장소, 목재 등 위험물의 노출유형에 따라 수소공급원으로부터 5~8m의 이격거리를 둔다.^{[7][8]}

2.3 기타 고려사항

수소 연료전지는 수전해의 역반응의 원리로 화학적 방법을 이용하기 때문에 내연기관이 요구되지 않으며 배출가스가 전혀 없다. 대신 기존의 동력장치에서는 생성되지 않았던 물이 생성되기 때문에 이것에 대한 고려가 반드시 필요하다. 물은 기계적, 전기적 장치에 있어 고장의 원인이 될 수 있으며 동절기에는 얼어붙을 위험이 있음을 고려해야 한다. 또한 순수한 물은 금속의 부식을 매우 쉽게 유발하므로 이에 대한 대처가 반드시 필요하다. 그렇기 때문에 생성되는 물의 배출 혹은 활용이 반드시 고려되어야 한다.

연료전지가 효율적으로 이온화하기 위해서는 용매에 일정 수준의 수분이 요구된다. 또한 정상적으로 작동하기 위해서는 일정 수준의 온도가 요구된다. 그렇기 때문에 사계를

가지고 있는 우리나라에서는 동절기에서의 연료전지의 구동과 오류의 가능성을 충분히 검토하여야 한다.

구동장치 및 기타 장치의 내구수명을 고려하여야 한다. 수소 연료전지 시스템에서 스택의 경우 축매로 사용되는 백금은 고가의 금속일 뿐만 아니라 열화현상이 발생하기 때문에 내구수명에 제한된다. 현재 자동차의 경우 15~20만km로 자동차 내구 주행거리와 유사하게 맞춰져 있으나 열차의 경우 그 주행거리가 더욱 길어지고 더욱 긴 수명이 요구된다. 그렇기 때문에 스택의 수명과 교체 가능성, 교체 시기 등에 대하여 반드시 고려하여야만 한다. 뿐만 아니라 배터리, 연료탱크 등에 대하여 마찬가지로 내구 수명을 고려하여야만 할 것이다. 또한 공기 공급 장치의 블로어와 같이 내구 수명이 짧고 고장이 자주 발생 할 수 있는 부품과 에어필터 및 이온필터 등 자주 교체하여야만 하는 부품에 대하여도 스페어 관리와 유지관리 방법이 요구된다.

3. 결 론

본 연구에서 알아본 바와 같이 수소 연료전지 열차는 저탄소 친환경 패러다임에 적합한 수단으로 활용이 기대되나 기존의 구동시스템과 전혀 다르며 수소연료에 대한 인식이 아직 부족하기 때문에 인프라 구축과 안전관리가 필수적으로 요구된다.

특히 연료인 수소의 생산 방법이 원유 개질과 부생수소보다 더욱 경제적이고 친환경적이어야 할 것이며 공급방법 역시 해결이 되어야 수소경제 시대에 적극적으로 활용되어 Zero-Emission 실현에 다가갈 수 있을 것이다. 또한 수소 충전 인프라가 충분하게 구축이 되고 법령과 기술기준에 문제가 없어야 운영이 가능할 것이다.

수소열차는 사람 혹은 화물을 운행하는 수송수단으로 운행에 있어 최우선 되는 것은 안전이다. 극인화성이자 고압가스인 수소를 사용하기 때문에 화재 및 폭발에 대하여 우선적으로 관리되어야 한다. 흔하게 사용하는 연료인 LPG, LNG 등과 비교하여 일반인에게

낮선 연료이기 때문에 더욱 특성에 맞게 관리가 되어야 한다. 부피농도 4~75% 에서 폭발분위기를 형성하며 가볍고 확산성이 높은 고압가스인 수소의 특성을 고려하여 폭발분위기 형성 방지를 위한 봉쇄, 격리 및 분리, 환기 등의 방법을 적용할 수 있으며 점화원과 이격거리 관리를 통하여 화재 방지 및 피해 최소화 할 수 있다.

그리고 수소 연료전지에서 생성되는 물에 의해 발생할 수 있는 고장, 부식 등의 위험요소를 고려하여야하며 동절기에서의 연료전지의 구동성, 연료전지와 BOP의 내구 수명 및 교체, 유지관리 등에 대해서도 고려하여야만 한다.

수소의 위험이라고 하면 가장 일반적으로 떠올리는 것은 수소폭탄이다. 수소폭탄의 경우 연료로 사용되는 수소와는 화학적 구조가 다른 이중수소 구조이며 폭발을 위하여 300 기압 이상의 압력과 1억 5천℃ 이상의 고온이 가해져야 하기 때문에 수소전기차나 수소열차가 수소폭탄처럼 폭발할 가능성은 매우 낮다. 하지만 고압가스에서 발생하는 위험은 여전하며 인화성 기체이므로 화재 및 폭발의 위험에서 자유로울 수 없다. 만약 화재 및 폭발 등의 안전사고가 발생한다면 승객은 우선적으로 수소폭탄이 떠올라 너리에 각인 될 수 있다. 그 경우 인식을 되돌리기는 매우 힘들게 될 것이다. 그러므로 만에 하나의 사고도 발생하지 않도록 수소열차에 대한 안전을 끊임없이 확인하며 인식을 개선 해 나갈 필요가 있다.

일본은 2006년 세계 최초로 수소 연료전지 하이브리드 철도차량을 개발하였지만 인프라 구축이 선행되지 않는 한 수소열차의 운행이 어렵다고 판단하였다. 이에 국가 정책적으로 수소충전소를 단계적으로 꾸준히 구축하였고 에네팜(ENE-FARM)을 통하여 가정용 수소 연료전지의 보급을 가속화하여 수소 경제의 인프라 구축에 힘썼다. 우리나라에서도 수소 열차의 운영을 위하여 인프라 구축과 법령, 안전에 대하여 충분한 검토가 이루어져야만 수소열차의 실용화를 앞당길 수 있을 것이다.

후 기

이 논문은 국토교통부에서 시행한 철도기술 연구사업 “수소연료전지 하이브리드 동력시스템 [1.2MW이상]을 적용한 철도차량 추진시스템 최적화 및 운용기술개발” 2세부 수소연료전지 하이브리드 철도차량 운영 및 관리방안 연구 (19-RTRP-B146016-02)사업의 연구비로 수행한 결과입니다.

참고문헌

- [1] 관계부처 합동 (2019) 수소경제 활성화 로드맵
- [2] <http://www.h2news.kr>
- [3] NEDO (2015) NEDO水素エネルギー白書
- [4] Linde korea (2011) MSDS: hydrogen
- [5] J.S. Ko (2012) Study on Probabilistic Analysis for Fire · Explosion Accidents of LPG Vaporizer with Jet Fire, J. Kor. Inst. Fire Sci. Eng., Vol. 26, No. 4, pp. 31-41.
- [6] BYOUNG WOO KANG and TAECK HONG LEE (2017) An Investigation of Hazard Distance in a Series of Hydrogen Jet Fire with the Hynam Tools, Trans. of Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol. 28, No. 2, pp. 166~173
- [7] HSE (2004) Fuel cells: Understand the hazards, control the risks
- [8] 한국산업안전보건공단 (2012) 연료전지의 설계 및 취급 안전 기술지침, KOSHA GUIDE, D-7
- [9] 이중희 외 (2012) 수소연료전지 공정에서 재정적 위험 및 환기영향 분석, 리스크 관리연구, 제 23권 제 1호
- [10] SEUNGKYU KANG et al. (2017) A Study on Safety Improvement for Packaged Hydrogen Refueling Station by Risk Assessment, Trans. of Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol. 28, No. 6, pp. 635-641
- [11] 우인성 외 (2009) 연료전지 공정에서 수소의 누출에 대한 위험성 평가로부터 안전성 확보에 관한 연구, 리스크 관리연구, 제20권 제1호