

수소전기차 피팅의 누출 거동 분석 및 구조적 설계 개선

저자 손우영, 박준서, 이찬빈, 홍예준, 김채원, 박준혁, 설진우, 김재호, 정경호, 정석영, 황영준

김천고등학교 23108 경상북도 김천시 송설로 90

ABSTRACT: 본 연구는 수소 에너지 활용 확대 과정에서 필연적으로 제기되는 고압 수소 저장 및 이송 계통의 누출 문제를 다각적으로 분석하는 데 목적이 있다. 우선 국내외 수소 충전소 및 저장 시스템에서 보고된 사고 사례를 검토하여 경제적, 환경적, 안전적 측면에서의 위험성을 확인하였다. 이어 고압 용기 및 피팅에서 발생 가능한 응력 집중, 수소 취성, 체결부 진동 하중의 영향을 고찰하였으며, 특히 주행 차량의 저주파, 고진폭 진동이 누출 개시에 미치는 역할을 규명하였다. 이러한 분석을 토대로 압력 변화와 진동 조건에 따른 누출 발생 가능성을 시뮬레이션하고, 확산 거동을 수치적으로 검증하는 연구를 설계하였다. 본 연구는 수소 에너지 인프라의 안전성 향상과 누출 방지 대책 수립에 기여할 수 있는 기초적 근거를 제공한다.

서론

수소는 이산화탄소를 배출하지 않는 청정에너지로 주목받으며, 수소전기차는 탄소중립을 위한 대안으로 빠르게 확산되고 있다. 그러나 수소는 분자 크기가 작고 점화 에너지가 극도로 낮아, 저장과 공급 과정에서의 누출은 치명적인 안전사고로 이어질 수 있다. 특히 700bar 급 고압 환경에서 수소를 운용하는 수소차에서는 배관과 피팅 등 연결부의 밀봉 성능이 안전 확보의 핵심이다. 최근 국내 수소차 검수에서 가스 누출 결함의 대부분이 피팅, 밸브 부위에서 발생한 사례는, 현재 피팅 구조의 기계적 신뢰성에 근본적 한계가 있음을 시사한다.

수소차는 운행 중 지속적인 진동과 충격을 받기 때문에, 시간이 지남에 따라 피팅 체결부에서 미세한 이완과 균열이 발생하고 수소 누출로 이어질 가능성이 높다. 반복 하중에 의한 피로 누적, 공진 현상, 체결력 저하 등은 모두 누출 개시의 원인이 되며, 수소 환경에서는 금속의 수소취성까지 더해져 구조 안정성을 더욱 위협한다. 따라서 피팅의 진동 하중 대응 성능과 밀봉 유지력을 평가하고 개선하는 연구가 절실하다.

본 연구는 수소차용 피팅 구조의 누출 메커니즘을 규명하고, 이를 바탕으로 안전성을 향상시킬 수 있는 구조 개선 방안을 제시하는 것을 목표로 한다. 우선 수소차에서 사용되는 주요 피팅의 종류와 구성 방식, 그리고 실제 운용 환경에서 나타난 누출 사례를 분석하고, 반복 진동에 따른 누출 경로와 개시 조건을 모델링한다. 이어서 Fick의 확산 법칙에 기반한 수치 시뮬레이션을 통해 누출 발생 시 차량 내 공간에서의 수소 확산 특성을 정량적으로 평가하며, 3D 시각화를 통해 위험 농도 형성 범위를 도출한다.

이러한 분석을 바탕으로 본 연구는 진동 흡수 기능을 포함한 개선형 피팅 구조, 이중 밀폐 구조, 수소 감지 기능 내장 피팅, 확산 억제용 안전 그리드 설계안을 제안한다. 이들은 실제 차량 환경에서 수소 누출 확률을 낮추고, 사고 발생 시 피해 범위를 제한하는 기술적 기반을 제공한다. 본 연구는 향후 수소 에너지 시스템의 설계 표준 수립과 실차 적용에 기여할 수 있는 실질적 대안을 제시하고자 한다.

이론적 배경

1.1 수소차 피팅 구조의 현황과 한계

수소연료전기차는 약 700 bar의 초고압 수소를 저장하기 때문에, 각 구성 요소를 연결하는 피팅의 기계적 신뢰성은 시스템 안전의 핵심이다. 수소는 분자 크기가 매우 작고, 점화 에너지가 낮으며, 확산 속도가 빠르기 때문에 미세한 틈새로도 누출이 용이하며, 이는 폭발적 연소의 위험을 증가시킨다. 실제로 국내외 사고 사례 및 차량 검사 결과에 따르면, 수소차에서 발생한 누출 중 상당수가 피팅과 배관 연결부에서 발생하였다. 따라서 피팅의 구조적 안정성과 진동 환경에서의 밀봉 유지 성능이 안전성 확보의 핵심 과제로 떠오르고 있다.

수소차에서는 주로 네 가지 유형의 피팅이 사용된다. 첫번째로, 콘 앤드 나사형 피팅은 고압 조건에서 신뢰성이 높아 초창기부터 널리 사용되었으나,

단일 선 밀봉 방식으로 인해 진동이나 온도 변화에 따른 미세 틈이 발생할 수 있다. 조립 시 토크 편차에 민감해 품질 편차가 크다는 한계가 존재한다. 두 번째로, 이중 페룰 피팅은 전방 페룰이 튜브를 강하게 물고 후방 페룰이 균일한 예압을 제공해 진동 하중에 대한 저항성이 높고, 이중 밀봉 구조로 누설 방지 효과가 뛰어나다. 세 번째로, 용접형 피팅은 일체화로 인해 누설 가능성이 가장 낮으나, 유지보수의 어려움과 제조 공정 복잡성이 있다. 네 번째로, 메탈 가스켓 방식은 나사 결합부를 제거하고 정밀 금속 가스켓을 압착하여 누설을 차단하는 방식으로, 주로 고정 배관이나 수소 충전소 인프라에서 사용된다.

수소차 및 충전 인프라에서 발생한 누출 사례는 진동 하중에 기인한 경우가 많다. 한 분석에 따르면, 충전소 설비 누출 원인의 약 47% 가량이 압축기 등의 진동으로 인한 것이었고, 특히 피팅과 배관 이음부에서 빈번히 발생하였다. 차량 주행 중 발생하는 반복 진동은 피팅 체결부의 미세한 풀림이나 균열을 유발하고, 누출 경로를 형성한다. 연구에서도 적정 토크보다 25% 정도 부족한 상태에서 체결된 피팅은 정상 상태 대비 높은 누출율을 보였으며, 피팅의 반복 조립 횟수가 증가할수록 기밀성이 저하되는 경향도 보고되었다. 반면, 정상 토크로 조립된 이중 페룰 피팅은 700 bar 조건에서도 대부분 누설이 관측되지 않았으며, 진동과 굽힘 하중을 복합적으로 가한 조건에서도 안정적인 성능을 유지하였다. 이는 설계 단계에서 충분한 예압 확보와 재료의 복원력 설계가 핵심임을 보여준다. 다만 장기간 사용 시 누설 가능성을 완전히 배제할 수는 없으며 주기적으로 유지보수 및 체결 상태 모니터링이 병행되어야 한다.

현재 수소차 피팅 설계의 주요 취약점은 다음과 같다.

첫 번째로, 피로 및 반복 진동 하중에 대한 내성 부족이다. 반복 충전과 주행에 따른 미세 진동이 축적되면 피팅 부위에서 피로 균열이 발생할 수 있으며, 특히 공진 주파수에 근접한 조건에서 구조적 위험이 가중된다. FEM 기반 피팅 구조 해석에서는 진동 모드에 따른 응력 집중이 특정 부위에 나타나는 것으로 분석되었고, 공진 회피 설계 및 응력 완화 구조가 요구된다.

두 번째로, 미세 틈새에 따른 누설 가능성이다. 수소 분자는 작은 틈으로도 확산되므로, 접촉면이

작거나 나사산 사이에 미세 갭이 존재할 경우 실링 실패로 이어질 수 있다. 이를 해결하기 위해 이중 밀봉 구조나 나사산 제거형 가스켓 피팅을 제안한다.

세 번째로, 수소취성에 대한 재질 문제이다. 수소는 금속 격자 내부로 침투해 재질의 연성과 강도를 저하시킬 수 있으며, 특히 스테인리스강 재질은 니켈 함량에 따라 수소취성 민감도가 다르다. ASTM 기준에서는 NI 10% 이상이지만, 고압 수소 환경에서는 12% 이상의 니켈 함량을 가진 합금이 권장된다. 또한 고분자 재질 역시 고압, 저온, 압력변동 환경에서 균열, 팽윤, 기포 형성을 방지할 수 있는 전용 소재를 채택해야 한다.

1.2 수소차에서 사용되는 피팅 종류 및 구성 방식

수소차의 연료공급계에는 용접형, 나사결합형, 콜릿(compression)형, O-링 페이스 실(ORFS)형 등 여러 피팅 방식이 사용된다. 용접형 피팅은 배관간 비가역적 용접(WIG/Orbital)으로 연결하여 이음새가 없으므로 누설 우려가 거의 없지만, 분해, 조립이 불가능하고 균열 방지 대책이 필수다. 나사결합형 피팅(금속 쉘형)은 37° 혹은 24°의 콘 형상을 맞대는 전통적 방식으로, 금속끼리 맞닿아 쉘링한다. 이 방식은 간단하지만 과도 조임 시 결함이 생기거나 진동에 의해 풀릴 위험이 있다. O-링 페이스 실(ORFS) 피팅은 직선 나사산 구조에 금속 평면과 O-링으로 밀봉하는 방식으로, 금속-금속 쉘보다 조임 허용범위가 넓고 체결이 용이하다.

1.3 현재 설계의 기계적 취약점

현재 설계된 피팅과 배관 시스템은 피로, 수소 침투, 크리프 및 부식과 같은 기계적 취약점을 갖는다. 먼저, 도로 주행이나 충방전 반복 과정에서 배관 및 피팅에는 주기적 응력이 가해져 피로 균열이 발생할 수 있으며, 특히 수소 분위기에서는 금속의 균열 전파 속도가 빨라져 충분한 안전계수가 요구된다. 또한 수소 분자는 크기가 매우 작아 피팅과 배관 사이의 미세한 간극을 통해서도 침투할 수 있다. 설계, 제조 공차나 표면 거칠기로 인해 생긴 틈새는 장기간 운용 시 수소 누출 경로가 되며, 금속 입계로 침투한 수소가 취성화나 블리스터(기포 팽창)를 유발할 수 있다. 따라서 체결 과정에서 표면 결함을 철저히 제거하고, 오링이나 개스킷은 수소 침투 저감 특성을 가진 재료를 선택해야 한다. 아울러

장시간 고압 수소에 노출될 경우 폴리머 계열의 가스킷이나 오링은 응력 크리프로 체결력이 저하될 수 있는데, 일반적인 PTFE 소재는 크리프 변형이 크기 때문에 크리프 저항성이 강화된 재료가 요구된다. 마지막으로, 스테인리스강이라도 대기 중 염분이나 오염물에 의해 피팅 부식이 발생하면 수소 누출과 피로 파손으로 이어질 수 있으므로, 페라이트 제어, 연마, 패시베이션과 같은 표면처리를 통해 내식성을 확보하는 것이 필요하다.

탐구 내용

2.1 진동 하중에 의한 누출 메커니즘 분석

수소 전기차는 주행 중 다양한 진동 하중에 노출되며 이는 고압 수소 피팅의 체결부에 반복적인 응력과 미세 운동을 유발한다. 이러한 진동은 시간이 지남에 따라 체결력 저하와 미세 틈 형성으로 이어질 수 있고, 외부 진동 주파수가 피팅 구조의 고유 진동수와 일치할 경우 공진 현상이 발생해 구조적 손상을 가속화한다. 특히 수소의 작은 분자 크기와 빠른 확산 특성으로 인해 아주 작은 틈도 누출로 이어질 수 있다. 이러한 진동 하중이 수소 피팅의 밀봉 안정성에 어떤 영향을 미치는지를 중심으로 누출 메커니즘의 작동 원리와 주요 위험 요인을 분석할 것이다.

2.2 차량 주행 진동의 특성 및 주파수 분석

일반적으로 노면 요철로 인한 차체 거동, 서스펜션 운동, 타이어 회전 및 불균형, 파워트레인 동역학, 주행풍에 의한 공력 진동 등이 주요 진동원으로 지목된다. 이러한 진동원들은 서로 다른 주파수 대역을 가지며 동시에 차량에 영향을 미친다. 예를 들어, 노면 충격에 따른 차체의 피치 및 롤링은 주로 1~5Hz의 저주파 영역에 나타나고 차량 구조물의 고유 진동이나 엔진 및 모터 진동은 수십 Hz까지의 중주파 영역에서 관찰된다. 특히 고속 회전하는 타이어에서는 20~50Hz 수준의 진동 성분이 두드러지며, 전기구동 파워트레인의 모터와 기어박스에서는 수백 Hz에 달하는 고주파 진동이 발생한다. 실제 주행시험 결과에 따르면 서스펜션 계통의 일부 구성부는 약 10~20Hz 부근에서 공진을 나타내고, 타이어와 지면의 상호작용으로 30~80Hz 범위의 진동 피크가 관찰되었다. 전기모터의 경우 회전속도와 구동 조건에 따라 100~500Hz 범위에서 진동 에너지가 우세해지는 것으로 보고되며 이는 내연기관 차

량에서 엔진 진동(통상 20~200Hz 이하)과 달리 높은 주파수 성분의 진동이 존재함을 뜻한다.

차량 진동 진폭은 도로 상태, 속도, 하중 등에 따라 크게 달라진다. 일반적인 포장도로에서 중속 주행 시 차체에 전달되는 수직 가속도는 대략 $\pm 0.05 \sim 0.1g$ 수준이지, 고속주행(100km/h 이상)에서는 서스펜션을 통한 진동 응답이 $\pm 0.2g$ 이상으로 증가할 수 있다. 특히 노면이 불규칙한 경우 순간적으로 $\pm 0.5g$ 에 달하는 충격 가속도 피크가 측정되기도 한다. 반면 저속(30km/h 이하) 주행 시에는 주로 1~10Hz의 낮은 주파수 진동이 지배적이며 속도가 증가함에 따라 10~50Hz 범위의 고주파 성분 기여도가 커진다. 과속방지턱과 같은 장애물을 넘을 때는 일시적으로 50Hz 이상의 높은 주파수 충격이 발생하고, 곡선 주행 시에는 약 1~3 Hz 영역의 롤링 진동 성분이 추가된다. 여러 연구에서는 진동 내구성 평가에서 저주파보다는 고주파(50~300Hz) 성분이 볼트 체결부 피로에 더욱 취약함을 지적하였는데 이는 높은 주파수의 미세 진동이 체결부 접촉면의 미끄럼을 유발하고 국부적 응력을 누적시키기 때문이다. 다시 말해 고주파 진동일수록 동일 진폭에서 체결부에 가해지는 누적 손상 효과가 크며, 진동 피로 수명이 단축될 가능성이 높다.

모든 기계 구조물은 자체적인 고유 진동수를 가진다. 외부 진동 주파수가 이러한 고유값과 일치하면 앞서 언급한 공진 현상이 발생하여 진동 진폭이 급격히 증폭된다. 공진 시에는 평소보다 몇 배나 큰 변형이 일시적으로 발생할 수 있고 반복될 경우 체결부의 피로 누적이 가속되는 한편 나사 풀림도 빠르게 진행될 수 있다. 따라서 수소 차량용 피팅을 설계할 때는 차량 주행 진동 스펙트럼 상 위험 주파수 대역(약 50~300Hz)에서 피팅 구조의 고유진동수가 겹치지 않도록 회피 설계해야 한다. 필요하다면 고무 부상, 방진 마운트 등을 통해 해당 진동 대역의 전달을 차단하거나 감쇠시켜 공진 가능성을 줄여야 한다. 공진 및 고주파 진동대역은 앞서 말한 바와 같이 수소 누출의 취약 구간이므로 설계 단계에서 재료 선정과 구조 변경을 통해 진동 영향을 최소화하는 것이 중요하다.

수소 저장용 배관 피팅은 높은 체결력으로 밀봉을 유지해야 하지만, 차량 진동은 장시간에 걸쳐 체결력 감소를 초래할 수 있다. 저주파 진동은 체결 부품 사이의 미세한 운동을 유발하여 볼트 풀림과 마찰력 소실로 이어지기 쉽고 고주파 진동은 접촉면 거동을 빠르게 변화시켜 국부 응력을 반복적으

로 집중시킨다. 이때 수소 원자가 금속 내부로 확산되면 미세 균열 성장 속도가 크게 증가하여 피팅 부위의 구조적 건전성이 저하된다. 예를 들어 STS316L 계열 강재에서는 수소 미포화 상태 대비 균열 전파 임계 길이가 단축되고 피로 한도가 하락하는 것으로 보고되었다. 결국 진동 하중은 기계적인 피로와 환경적 취성 효과를 복합적으로 유발하여 체결부에 미세 틈이 발생하는 개시 조건을 만든다. 한편 한 진동 시험에서는 150 시간 후 체결 부위의 누설률 증가가 체결력 저하와 썸(face) 손상에 기인함이 지적되었다. 이는 진동으로 인해 볼트 장력이 풀리고 가스켓 면이 마모된 결과로 해석된다.

2.3 공진, 피로 누적, 반복하중에 의한 이완 현상

공진에 의한 진폭 증폭에 대해 설명하자면 외부 진동 주파수가 피팅 구조물의 고유진동수와 일치할 경우, 진동 진폭이 급격히 증가하며 체결부 하중이 과도하게 증폭될 수 있다. 이는 체결된 나사산 부위나 페럴 접촉면에서 순간적인 미끄러짐이나 마모를 유도해 체결력 저하로 이어질 수 있다. 피로 누적의 발생 원인은 반복적인 미세 진동이 구조물 내 국부 응력을 지속적인 유발과 금속 재질 내부에는 초기 결함이나 표면 거칠기와 맞물려 미세 균열이 발생한다. 한 연구에서는 수소 환경 하에서 0.01~5 Hz의 저주파 반복 하중이 Ni-Cr-Mo 합금의 피로 수명을 크게 단축시킨다고 밝혔다. 이는 수소가 금속 내부에 침투해 취성을 증가시키고, 반복 응력 하에 균열이 급속히 성장하게 된다는 것을 시사한다. 반복 하중과 진동은 체결된 부품의 접촉면을 점진적으로 마모시키며, 표면 미끄러짐과 함께 체결 토크가 감소하게 된다. 즉 체결력 이완이 일어나게 된다. 고압, 고진동 환경은 단일 피로 현상 외에도 다양한 열화 기작과 중첩된다. 또한 수소가 금속 결정립계로 침투하여 재료를 취성화시키며, 수소 농도 증가 시 균열의 임계 전파 길이가 짧아진다는 것이 확인되었다. 이러한 메커니즘은 단순한 진동이나 체결 미흡 이상의 복합적 피로 누적 현상이며, 장시간 운행 조건에서 피팅 구조 설계에 중요한 고려 요소이다.

3.1 수소 확산 시뮬레이션 및 위험 평가

수소전기차에서의 수소 가스 누출은 그 특성상 빠른 확산과 광범위한 가연 범위로 인해 안전면에서의 중요한 쟁점이다. 특히 차량이나 충전소 등의 밀폐, 또는 부분밀폐된 공간에서 수소가 누출될 경우

가연성 농도 범위의 수소-공기 혼합물이 형성되어 화재 또는 폭발로 이어질 위험이 크다. 실제로 수소는 공기보다 14 배나 가벼워 누출 시 빠르게 공기 중에 퍼지고 희석되지만, 가연 농도 범위가 매우 넓고 화염 전파속도가 빨라 위험성이 높다. 또한, 최소 점화에너지가 0.018 mJ로 낮아 작은 정전기에도 쉽게 발화될 수 있다. 이러한 수소의 확산 거동과 위험성을 정확히 평가하기 위해 Fick의 확산 법칙에 근거한 시뮬레이션 기법과 전산유체역학 해석이 이용되는 방식을 알아보고, 실제로 이를 적용해 볼 것이다

3.2 Fick의 제 1 법칙 및 제 2 법칙

독일의 물리학자 Fick이 제시한 확산 법칙은 농도 구배에 따른 물질 이동을 기술하며, 정상상태와 비정상상태의 두 가지 법칙으로 구분된다. 먼저, Fick의 제 1 법칙은 확산되는 물질의 플럭스가 농도 기울기에 비례한다는 내용을 담고 있다. 수학적으로는 다음과 같이 표현된다.

$$J(x) = -D \nabla C(x)$$

여기서 $J(x)$ 는 확산 플럭스 벡터이고, $C(x)$ 는 위치 x 에서의 수소 농도이며, ∇C 는 농도의 공간 미분이다. D 는 확산 계수로서 물질과 확산 매질의 조합에 따라 결정되는 비례상수이다. 음의 부호를 가지는 이유는 농도가 높은 곳에서 낮은 곳으로 물질이 이동하기 때문이다. 즉, 수소 가스는 주변보다 농도가 높은 지점, 즉 누출 지점에서 낮은 지점 방향으로 자연스럽게 퍼져 나가며, 그 속도는 확산 계수 D 와 농도 구배의 곱으로 주어진다. Fick의 제 1 법칙은 시간에 따라 농도 분포가 변하지 않는 확산일 때 적용되며, 이때 확산 속도는 시간에 무관하게 일정하다.

두번째로, 수소 차량 누출과 같이 시간에 따라 농도 분포가 변하는 비정상 상태 확산에는 Fick의 제 2 법칙이 적용된다. 제 2 법칙은 앞서 제 1 법칙과 질량 보존의 연속 방정식을 결합하여 유도되며, 확산 방정식이라고도 불린다. 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\frac{\delta C}{\delta t} = D \nabla^2 C$$

여기서 $\frac{\delta C}{\delta t}$ 는 농도의 시간에 따른 변화율, ∇^2 는 Laplace 연산자로 공간에서의 확산을 의미한다. 이 방정식은 주어진 확산 계수 D 에서 시간에 따라 농

도 분포 $C(x, t)$ 가 어떻게 변화하는지를 나타낸다. 쉽게 말해, 농도의 시간 변화는 농도의 공간 두 번째 도함수에 비례한다. 만약 확산 계수 D 가 일정하다면, 위 식은 $\frac{\delta C}{\delta t} = D \frac{\delta^2 y}{\delta x^2}$ 의 형태로 단순화된다. 이 확산 방정식을 풀면, 초기, 경계 조건에 맞는 시간에 따른 수소 농도 분포 함수를 계산할 수 있다. 확산 계수 D 는 수소 확산의 핵심 변수이다. 수소는 분자량이 작고 운동속도가 빨라 공기 중 확산계수가 비교적 큰 값인데, 25℃, 1 atm 조건에서 약 $0.71\text{cm}^2/\text{s}$ (즉 $7.1 \times 10^{-5}\text{m}^2/\text{s}$)로 알려져 있다. 이는 같은 조건에서 산소의 확산계수보다 약 3.4 배 큰 수치로, 수소가 그만큼 빠르게 퍼지는 기체임을 의미한다. 실제로 수소는 누출 시 기체가 위로 부력에 의해 솟아오르며, 공기 중에 신속히 퍼져나가 폭발을 위한 가스구름이 형성되기 어려울 정도로 빠르게 희석된다.

3.3 확산 거리 및 농도 분포 계산

확산 거리란 일정 시간 동안 수소가 어느 정도 범위까지 퍼져 나가는지를 의미한다. 만약 분자 확산만으로 수소가 퍼진다고 가정한다면, 확산 거리는 시간에 비례하는 것이 아니라 시간의 제곱근에 비례하는 특성을 보인다. 이는 확산 방정식의 해에서도 출되는 특성이다. 예를 들어, 확산계수가 D 인 환경에서 수소가 누출되었다면, t 초 후에 농도 분포가 유의미하게 펼쳐지는 특성 거리를 대략적으로 $l \approx \sqrt{2Dt}$ 로 추산할 수 있다. 확산계수가 $6 \times 10^{-5}\text{m}^2/\text{s}$ 인 공기에서 $t=1$ 일 때 확산 길이는 $l = \sqrt{2 \times 6 \times 10^{-5} \times 1} \approx 0.011\text{m}$ (약 1.1 cm) 정도에 불과하다. $t=10$ 초일 경우도 $\sqrt{2 \times 6 \times 10^{-5} \times 10} \approx 0.034\text{m}$ (약 3.4 cm) 수준으로, 분자 확산만으로는 짧은 시간에 수 센티미터 수준까지 퍼지는 데 그친다. 그러나, 실제 수소 누출 상황에서는 초기 누출 제트의 힘과 부력에 의한 대류 현상이 결합되어 순수 확산보다 훨씬 빠르게 혼합이 진행된다. 수소는 가벼워 위로 상승하고, 이로 인해 누출 시 발생하는 난류와 주변 공기의 흐름에 의해 확산 거리가 지속적으로 증가하는 양상을 띤다. 실제 상황에서는 수소가 급격히 인근 공간 전체로 퍼질 수 있다고 볼 수 있다.

농도 분포 계산은 확산 방정식의 초기 조건과 경계 조건을 설정함으로써 가능하다. 초기 조건은 누출이 발생한 시점의 수소 농도 상태를 의미한다.

예를 들어 차량 연료탱크로부터 일정량의 수소가 순간적으로 새어 나왔다면 누출 지점 근처에서 초기 농도가 높고 먼거리에서는 0 인 분포로 시작한다. 경계 조건은 확산 공간의 경계에서의 농도를 지정하는 것으로, 개방된 환경이라면 경계에서 수소 농도가 0 으로 유지되거나 대류 확산으로 흘러나가는 개방 조건이 적용된다. 무한 개방 공간에서는 먼 거리에서 수소 농도가 대기 중 자연수준 0 에 가깝다고 볼 수 있다. 반면 밀폐 용기나 차량 실내와 같이 유한한 경계가 있는 경우, 벽면에서의 수소 흡착, 반사와 같은 변화에 따라 경계 조건을 달리 설정할 수 있다.

이 확산 방정식을 이용해 수치해석 기법으로 농도 분포를 쉽게 시뮬레이션할 수 있다. 실제 연구 사례에 따르면, 수소 누출 실험과 수치해석 결과를 비교 검증하여 모델의 신뢰성을 확보한 뒤 다양한 조건에서 농도 분포를 계산하는 접근이 많이 활용된다. 예를 들어 한 대학 연구에서는 육면체 챔버 내에서 수소를 누출시키는 실험을 하고, 이를 CFD 로 일치함을 확인한 뒤 누출 구멍의 크기별로 가스 농도 분포와 가연 영역의 변화를 분석하였다. 그 결과, 누출 구멍의 직경이 클수록 동일 시간 내에 가연성 농도 영역이 훨씬 빠르게 커지며, 누출량과 천장까지 가연혼합물이 도달하는 데 걸리는 최소 시간 사이의 관계를 도출했다고 보고하였다. 이는 누출량이 많을수록 수소가 상부로 차오르는 속도가 빨라진다는 의미로, 밀폐 공간 안전 설계에 중요한 정보이다. 특히 이 연구에서는 수소 가스의 변화가 특정 지점의 농도 측정 결과 등방성으로 퍼져나가, 단순한 기하학적 형상보다는 누출 유량과 누적에 의해 지배된다고 언급하였다.

누출 지점으로부터의 농도 분포는 거리와 시간의 함수로 나타난다. 일반적으로 누출원의 농도가 가장 높고, 거리가 멀어질수록 농도는 감소하는 경향을 보인다. 누출 직후에는 누출구 주변에 국한된 높은 농도 영역이 형성되지만, 약 30 초 정도 지나면 농도 분포가 어느 정도 안정화되어 더 이상 짙은 농도 영역이 커지지 않고 준정상 상태에 도달했다고 말한다. 이는 일정량의 수소가 누출된 후 환기나 확산에 의해 어느 정도 균형을 이루는 상태로 볼 수 있다. 다만 환기가 전혀 없는 완전 밀폐된 공간이라면 시간이 지날수록 공간 전체의 수소 농도가 점차 올라가 위험한 수준에 이를 수도 있다. 따라서 확산 거리와 농도 분포 계산 시에는 해당 공간의 환기 조건도 함께 고려해야 한다. 만약 자연환

기나 강제환기가 있다면 농도 분포가 지속적으로 희석되고 확산 거리가 변화될 수 있다.

3.4 누출 위치에 따른 위험 구간 시각화 과정

```
Lx, Ly = 1.0, 1.0
nx, ny = 121, 121
D_air = 7.1e-5
beta_vertical = 3.0
total_time = 60.0

leak_location = (0.3, 0.2)
leak_radius = 0.01
leak_strength = 8.0
```

시뮬레이션 영역, 격자, 확산계수, 수직 확산 가중치, 총 시뮬레이션 시간 및 누출 위치, 영역 크기, 누출 속도를 정의해 초기 변수를 설정한다.

```
dx, dy = Lx/(nx-1), Ly/(ny-1)
x = np.linspace(0, Lx, nx)
y = np.linspace(0, Ly, ny)
X, Y = np.meshgrid(x, y, indexing="xy")

Dx = D_air
Dy = beta_vertical * D_air

dt_stable = 0.5 / (2*Dx/(dx*dx) + 2*Dy/(dy*dy))
dt = 0.9 * dt_stable
nsteps = int(np.ceil(total_time / dt))
dt = total_time / nsteps

C = np.zeros((ny, nx), dtype=np.float64)
```

2D 좌표계를 설정 및 수평 및 수직 확산 계수를 초기화 한 후, 안정 조건을 고려하여 시간 간격과 반복 횟수를 계산한다. 마지막 줄은 좌표계 전체 영역을 0 농도로 초기화해 누출 전 상태를 준비한다.

```
x0, y0 = leak_location
source_mask = ((X - x0)**2 + (Y - y0)**2) <= leak_radius**2

if not source_mask.any():
    ix = np.argmin(np.abs(x - x0))
    iy = np.argmin(np.abs(y - y0))
    source_mask[iy, ix] = True
```

누출 위치에 해당하는 셀 마스크를 생성하고, 최소 하나의 셀을 포함하게 한다.

```
times, area_over_4, area_over_18, max_conc = [], [], [], []
rx = Dx * dt / (dx*dx)
ry = Dy * dt / (dy*dy)
```

위험 영역을 추적하기 위한 리스트를 초기화 하고, 확산 계산 비율을 계산한다.

```
def leak_profile(t):
    return 1.0 + 0.2 * np.sin(2 * np.pi * 1.0 * t)

def apply_boundaries(C):
    C[:, 0] = C[:, 1]
    C[:, -1] = C[:, -2]
    C[0, :] = C[1, :]
    C[-1, :] = 0.0
    return C
```

leak_profile 함수는 시간에 따라 누출 속도가 진동하도록 정의하여 실제 누출 변화를 구현하였다. apply_boundaries 함수에서는 좌우와 바닥은 유량 0, 상단은 개방 경계를 적용하여 상단으로 좀 더 잘 퍼지도록 설정하였다.

```
for step in range(nsteps):
    t = step * dt
    Cn = C.copy()
    C[1:-1, 1:-1] = (
        Cn[1:-1, 1:-1]
        + rx * (Cn[1:-1, 2:] - 2*Cn[1:-1, 1:-1] + Cn[1:-1, :-2])
        + ry * (Cn[2:, 1:-1] - 2*Cn[1:-1, 1:-1] + Cn[:-2, 1:-1])
    )
    C[source_mask] += leak_strength * leak_profile(t) * dt
    np.clip(C, 0.0, 100.0, out=C)
    C = apply_boundaries(C)

    if step % max(1, int(0.1 / dt)) == 0 or step == nsteps-1:
        times.append(t + dt)
        area_over_4.append((C >= 4.0).sum() * dx * dy)
        area_over_18.append((C >= 18.0).sum() * dx * dy)
        max_conc.append(C.max())
```

메인 for 문이다. 여기서는 중앙차분과 오일러 전진법을 이용하여 수평과 수직 확산을 계산해 농도를 업데이트한다. 이후, 농도값이 0~100% 이내의 정상적인 범위에 머물도록 설정하고, apply_boundaries 함수를 통해 경계 조건을 적용한다. 마지막 if 문에서는 4%, 18% 이상 농도 영역 면적과 최대 농도를 기록하여 위험 영역 변화를 추적한다.

```
levels = []
if C.max() >= 4.0:
    levels.append(4.0)
if C.max() >= 18.0:
    levels.append(18.0)
if levels:
    CS = plt.contour(X, Y, C, levels=levels, colors='k', linewidths=1.0)
    plt.clabel(CS, inline=True, fmt='%1.0f%%', fontsize=8)

plt.scatter([x0], [y0], marker='x')
plt.title("Final H2 concentration field")
plt.xlabel("x (m)")
plt.ylabel("y (m)")
plt.tight_layout()
plt.show()
```

출력부 코드이다. 위험 농도 수준에 해당하는 등농도선을 표시한다.

```
plt.figure(figsize=(6,4))
plt.plot(times, area_over_4, label="Area >= 4% (m^2)")
plt.plot(times, area_over_18, label="Area >= 18% (m^2)")
plt.xlabel("Time (s)")
plt.ylabel("Area (m^2)")
plt.title("Hazardous area growth")
plt.legend()
plt.tight_layout()
plt.show()
```

시간에 따른 위험 농도 영역의 면적 변화를 그래프로 시각화하는 코드이다.

이 시뮬레이션은 한 지점에서 수소가 새기 시작했을 때, 시간이 지남에 따라 주변으로 어떻게 퍼져나가는지를 계산하기 위해 구현하였다. 1미터 x 1미터 크기의 가상의 평면 공간을 바둑판처럼 잘게 나눈 뒤, 각 칸마다 수소 농도를 계산하고 아주 짧은 시간 간격마다 업데이트하는 방식으로 진행된다. 누출 지점에서는 매 순간 일정한 양의 수소가 계속 나오도록 설정했으며, 누출량이 시간에 따라 주기적으로 변화하도록 설계해 실제 상황의 변동을 계산하였다.

수소의 확산 계산에는 Fick의 제 2 법칙을 적용했다. 이 법칙을 이용하면 한 칸에 있던 수소가 주변 칸으로 조금씩 확산되는 과정을 수치적으로 계산할 수 있다. 격자의 경계 조건은 위쪽은 열려 있어 농도가 0이 되도록 설정했고, 나머지 세 면은 막혀 있어 수소가 밖으로 빠져나가지 않도록 했다.

시각화 시뮬레이션이 끝난 뒤에는 누출 지점에서 시작된 수소가 주변으로 확산된 최종 분포를 얻을 수 있다. 결과는 색깔로 시각화해 전체 농도 분포를 한눈에 볼 수 있도록 했고, 동시에 농도가 4% 이상 또는 18% 이상인 위험 구역의 면적이 시간에 따라 변하는 양상을 그래프로 나타냈다.

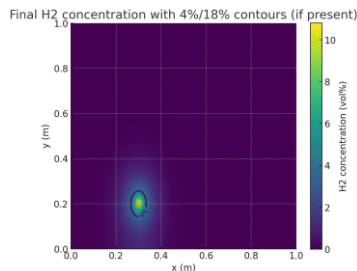


그림 1. 가상의 수소 누출원 주변에 대해 3차원으로 나타낸 수소 농도 위험 구역 예시

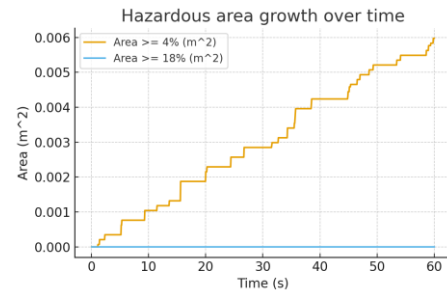


그림 2. 시간에 따른 위험도 증가 그래프

수소 누출에서의 위험 구간이란 수소-공기 혼합물의 농도가 연소 혹은 폭발을 일으킬 수 있는 범위에 해당하는 공간적 영역을 말한다. 앞서 언급했듯이 수소의 연소 한계는 약 4% ~ 75%이며, 이 범위 내에서는 발화원이 있을 경우 쉽게 발화할 수 있다.

이때 누출 위치와 방향에 따라 위험구역의 형태와 범위는 크게 달라진다. 우선, 누출 방향이 위를 향하는지 아래를 향하는지가 중요한 요소이다. 수소는 누출 시 가볍게 상승하려는 경향이 있으므로, 만약 누출구가 차량 상부나 옆면 등을 통해 위쪽으로 분출된다면 수소는 비교적 빨리 대기로 날아가 흩어진다. 이는 위험 영역이 차량 상부로 일시적으로 형성된 후 곧 소멸할 수 있음을 의미한다. 실제로 2021년 국내 한 사례에서 타이어 화재로 수소저장용기의 TPRD(온도압력 방출장치)가 작동해 상부 방향으로 제트화염이 분출된 일이 있었다. 이는 화재 시 수소를 가능한 한 위로 방출시켜 차량 및 주변으로의 확산을 줄이고 신속히 회색시키기 위함이다. 반면, 만약 불가피하게 하향 분출이 될 경우 상황이 더 위험해질 수 있다. 수소가 아래로 분출되면 바닥면을 따라 퍼지게 되고, 차량 하부나 지면 근처에 수소 가스 구름이 형성된다. 이 경우 바람이 없거나 약하다면 차량 하부 공간에 수소가 상당 시간 잔류할 수 있다. 풍속 0에 가까운 정지된 공기 환경에서 차량 아래쪽으로 새어나온 수소는 곧바로 대기로 흩어지지 못하고 밀바닥에 고였다가 서서히 퍼져나가므로, 길은 농도가 지속 시간 길게 유지될 가능성이 있다. 다행히 현대 수소차의 경우 수소 저장용기의 TPRD 방출구를 대체로 측면 또는 상부로 배치해 바닥으로 직접 수소가 뿜어져 나오는 것을 피하도록 제작한다.

누출 위치가 실내 또는 실외인지도 위험 구간을 크게 좌우한다. 열린 환경에서 수소가 누출되면 앞

서 언급한 대로 가스가 곧장 위로 솟구쳐 올라가면서 빠르게 희석되고 확산된다. 이 경우 수소-공기 혼합물이 폭발 범위의 농도를 유지한 채 머무르는 시간이 매우 짧고 공간적 범위도 제한적이다. 반면 터널이나 지하주차장 같은 밀폐된 환경에서는 누출된 수소가 밖으로 빠져나가지 못하고 천장과 같은 상부 공간에 머무르면서 위험 농도 구름을 형성하게 된다. 실제 연구에 따르면, 지하 주차장에 수소가 누출되면 누출된 수소가 천장 아래 층을 이루며 채류하고, 만약 점화되면 큰 폭발 사고로 이어질 수 있다고 분석되었다. 한 시나리오 분석에서는 이러한 지하주차장 누출 사고를 소방 대응이 가장 어려운 경우로 분류하였다. 이는 밀폐된 공간에서는 누출 범위와 폭발 시점을 예측하기 어렵고, 폭발 시 피해 규모가 매우 커지기 때문이다. 특히 누출 가스가 폭발하면 그 충격파가 벽면에 반사되고 증폭되어 더 높은 압력을 발생시킨다. 국내 연구에서 밀폐 공간 내 차량용 수소저장용기가 폭발하는 실험을 한 결과, 차량으로부터 7 m 떨어진 지점에서도 84 kPa 이상의 폭발이 측정되어 90% 확률로 고막 파열 상해를 입힐 수 있는 수준이었다고 보고되었다.

3.5 차량 내 공간에서의 확산 특성 정리

수소전기차의 실내 공간은 사람의 안전과 직결되는 영역이므로, 수소 누출에 대한 철저한 대비가 필요하다. 일반적으로 연료전지차의 설계에서는 수소저장용기와 공급 라인을 승객 실내와 격리시켜, 설령 누출이 발생해도 수소가 바로 실내로 유입되지 않도록 하고 있다. 예를 들어 수소탱크는 차량 하부나 트렁크 격벽 뒤쪽에 배치되고, 배관도 엔진룸 바깥쪽을 따라 설치하여 실내 공조계통과 분리하는 식이다. 또한 수소차에는 수소 누출 감지 센서가 차량 내부 여러 곳에 장착되어 있다. 이 센서들은 수소 농도가 수 ppm 수준만 올라가도 경보 및 제어를 수행하며, 특히 4% (연소하한) 수준에 도달하기 훨씬 이전에 감지하여 연료공급 차단, 창문 개방, 경고 표시 등의 조치를 취하도록 설계되어 있다. 최근에는 0.005% (50 ppm)의 극미량 수소까지 감지할 수 있는 MEMS 기반 센서 기술이 개발되어, 기존 센서 대비 10 배 이상 민감하게 누출을 탐지할 수 있게 되었다고 보도되었다. 이러한 첨단 센서와 차단장치 덕분에, 일상 주행 중 실내에서 수소가 누출되어 위험 농도까지 이르는 것은 극히 낮은 확률로 관리되고 있다.

그러나 가상의 상황으로 차량 캐빈 내부에 수소가 스며든 경우를 생각해 보면, 그 확산 양상은 일반 밀폐된 방과 유사하게 전개된다. 수소는 실내 공기보다 가볍기 때문에 누출 시 위쪽 공간부터 채워나가는 경향을 보인다. 예컨대 좌석 하단이나 바닥 근처에서 수소가 새어나왔다면, 초기에는 바닥 부근에 일시적으로 높은 농도의 수소가 머물 수 있지만 곧 대류를 일으키며 위로 치솟아 천장 쪽에 모이게 된다. 천장에 고인 수소는 한편으로는 천장면을 따라 수평 방향으로 퍼져나가고, 다른 한편으로는 문 틈이나 환기구를 통해 차량 외부로 서서히 빠져나갈 것이다. 실험적으로 밀폐 용기 내부 누출을 관찰한 결과를 보면, 수소 가스는 누출 후 상층부에 얇은 층(flow stratification)을 이루며 축적되는 특성이 있다. 수소층 아래에는 비교적 산소가 충분한 공기가 남아 있게 되는데, 만약 어떤 이유로 점화가 일어나면 상층부의 수소층이 순간적으로 연소하면서 압력이 급상승할 위험이 있다.

다행히 승용차 실내 공간은 완전히 밀봉되어 있지 않고, 공조 시스템의 외기 도입구나 차체 패널 틈 등을 통해 일정 환기가 이뤄지므로, 누출된 수소가 시간이 지남에 따라 상당 부분 외부로 배출될 수 있다. 가령 창문이 약간이라도 열려 있다면 부력으로 상승한 수소가 그 틈으로 빠져나가 농도가 치명적으로 높아지는 것을 막을 수 있다. 실제 수소차의 매뉴얼에도 실내 수소 경보 발생 시 즉시 창문을 열고 정차 후 하차하도록 안내하고 있다 (가상의 예시). 이는 실내에 쌓인 수소를 신속히 빼내어 환기시키기 위한 조치다.

일부 연구는 차량 실내에서의 수소 확산을 시뮬레이션하기도 하였다. 예를 들어 한 연구에서는 승용차 캐빈을 본뜬 체적에서 수소 누출 실험을 CFD로 모사하여, 누출 위치와 환기 조건에 따른 농도 분포 변화를 분석하였다. 그 결과 누출 초기에는 국부적으로 높은 농도가 형성되나, 수초 내에 실내 공기와 혼합되면서 비교적 균일한 농도 분포를 보였고, 천장 부근에 가장 높은 농도의 층이 생기는 현상이 관찰되었다고 한다. 이는 앞서 언급한 바처럼 중력 효과로 인한 성층화(stratification) 현상으로 이해할 수 있다. 또한 시간이 충분히 경과하면 차량 내부 전체 농도가 서서히 상승할 뿐 특정한 지점만 농도가 치솟지 않는 등, 등방적 확산 경향도 나타났다고 보고하였다. 이러한 결과는 차량 내부가 비교적 작은 공간이라 일정 시간이 지나면 혼합이 잘 이루어지기 때문으로 볼 수 있다.

물론 이 모든 과정은 센서에 의해 조기에 탐지되어 차단/환기 조치가 취해지므로, 실제 사람이 탑승한 상태에서 치명적인 상황까지 이르는 것은 극도로 드물다. 종합하면, 차량 실내에서의 수소 확산 특성은 수소가 위쪽으로 모이는 경향이 있고, 시간이 지나며 실내 공기와 섞여 전체적으로 농도가 균일해지는 경향을 보이며, 환기나 개방이 있으면 농도가 급격히 떨어진다는 점으로 요약된다. 무엇보다도 사전 예방 및 감지가 중요하여, 현대 수소차들은 다중 센서와 안전 시스템으로 실내 누출을 관리하고 있다. 만약의 경우 실내에서 4%에 근접하는 수소 농도가 감지된다면, 이는 이미 연소 하한에 해당하므로 즉각적인 대응이 필요하다. 차량은 연료전지 시스템을 긴급 정지하고 모든 솔레노이드 밸브를 닫아 추가 수소 공급을 막으며, 경고음을 울려 승객에게 알려준다. 운전자는 신속히 창문을 열고 차량을 안전한 장소에 정차시켜야 한다.

이러한 매뉴얼은 극단적 상황을 가정한 것이지만, 이는 곧 제조사와 관계 기관이 수소차 실내 안전성을 얼마나 중요하게 고려하고 있는지를 보여준다. 실제 통계를 보면 수소차 보급 이후 현재까지 차량 내부 수소 누출로 인한 인명 사고는 보고된 바 없으며, 이는 설계 단계에서부터 다중 안전장치를 통해 위험성을 상당 부분 제거했기 때문으로 분석된다. 마지막으로, 차량 내 확산 특성과 관련하여 한 가지 주목할 점은 온도와 습도 조건이다. 수소 센서나 확산 거동은 온습도의 영향을 받을 수 있다. 차량 내부는 계절과 에어컨 작동 여부에 따라 고온다습해지기도, 한랭 건조해지기도 한다. 이러한 환경에서 수소 센서의 정확도를 유지하기 위한 기술도 개발되고 있으며, 센서의 설치 위치도 공조 흐름 등을 고려하여 최적화된다. 이렇듯 차량 실내 확산에 관해서는 센서 기술, 환기 구조, 구조 재질 등 다각도의 고려가 이루어지고 있다.

4.1 누출 방지를 위한 피팅 구조 설계 원칙

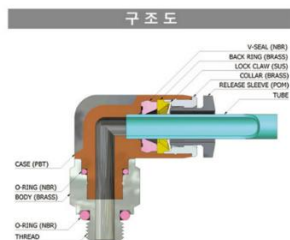


그림 2. 이중 피팅 구조를 적용한 수소 배관

수소 피팅의 구조 설계는 수소의 특성상 누출을 최대한 억제하여 잠재적인 위험을 없애는 방향으로 이루어져야 한다. 수소 분자는 매우 작고 확산 속도가 빨라, 미세한 틈만으로도 쉽게 누출될 수 있다. 실제로 수소 배관 및 피팅에서의 누설은 안전사고의 주요 원인으로 지적되고 있으며, 이를 방지하기 위해서는 구조적, 재료적, 공정적 측면에서 여러 방면의 대책이 필요하다. 이러한 특성 때문에 피팅 설계 시 이중 폐럴 구조와 같이 다중 밀봉을 제공하는 방식이 널리 채택되고 있다. 이중 폐럴 구조는 두 개의 금속 링이 튜브를 감싸며 각각 독립적으로 밀봉 기능을 수행한다. 전방 폐럴은 넓은 접촉면을 통해 1차 밀봉을 제공하고, 후방 폐럴은 튜브를 강하게 고정해 2차 밀봉과 기계적 지지 역할을 한다.

이때 피팅 구조의 검증은 단순한 압력시험만으로는 불충분하며, 실제 차량에서 발생하는 진동 주파수(약 10~500Hz)와 공진 조건을 반영한 가속 진동 시험이 병행되어야 한다. 실제 일본의 수소 충전소 설비에서 보고된 사례에서도 배관 연결부가 충전기 진동(30~80Hz)과 공진하여 누설로 이어진 바 있으며 이는 방진 구조의 필요성을 뒷받침한다. 따라서 설계 단계에서 고유진동수를 주행 스펙트럼과 분리하도록 재질, 두께, 형상을 조정하며, 반복 진동 후 피팅 성능과 누설 여부를 검증해야 한다.

피팅의 접촉면은 정밀 가공되어야 하며, 표면 거칠기를 최소화하고 각도를 정확하게 맞추는 것이 중요하다. 제조 공정에서의 미세한 흠집이나 조립 시 과도하거나 부족한 체결력은 누출의 주요 원인이 되므로, 권장 토크를 철저히 준수해야 한다. 특히, 반복적인 체결과 해체에도 밀봉 성능이 유지될 수 있도록 재조립성이 우수한 구조가 요구된다. 실제 연구에서는 반복 체결 후에도 밀봉 성능을 유지하는 피팅 구조의 중요성이 강조되고 있으며, 이를 위해 접촉면의 표면 품질 관리와 체결력 관리가 필수적임이 확인되었다.

수소 피팅의 소재 선정 역시 매우 중요하다. 수소 취성에 강한 스테인리스강과 같은 내식성과 내압성이 검증된 소재를 사용해야 하며, 국제 표준에 부합하는 소재를 적용해야 한다. 실제로 수소 환경에서의 피팅 소재는 수소 취성, 응력 부식 균열 등에 대한 내성이 요구되며, 국내외 표준에서는 스테인리스강 등 특정 재질의 사용을 권장하고 있다.

피팅의 연결부는 가능한 한 용접 접합을 우선적으로 적용하고, 불가피하게 피팅을 사용할 경우 연결

부의 수를 최소화해야 한다. 이는 연결부가 많아질수록 누출 위험이 증가하기 때문이다. 또한, 피팅은 육안 점검 및 유지보수가 용이한 위치에 설치되어야 하며, 필요시 누출 감지 센서와 감지기를 병행 설치해 미세 누출도 조기에 발견할 수 있도록 해야 한다. 실제 실험에서는 이중 링 튜브 피팅이 700 bar 환경에서 누출이 거의 발생하지 않았으며, 동적 스트레스에도 높은 내구성을 보였다. 반면, 체결력 부족이나 접촉면 손상, 표면 흠집이 있을 경우 누출률이 급격하게 증가하는 것으로 나타났다.

4.2.1 방진 기능 강화 구조 제안

수소 피팅은 차량의 주행이나 충전 환경에서 반복적인 진동과 충격에 노출된다. 이러한 진동은 체결부의 연결을 느슨해지게 하고, 미세 균열을 유발해 누출 위험을 높일 수 있다. 진동에 의한 체결력 저하를 방지하기 위해서는 이중 페럴 구조의 탄성 변형 특성을 활용해야 한다. 이 구조는 반복 진동에도 체결력이 유지되며, 실제로 동적 하중에 대한 내구성이 입증된 바 있다. 또한, 피팅 고정 브래킷이나 배관과 피팅 사이에 고무, 폴리우레탄, 고감쇠 합금 등의 진동 흡수재를 삽입하거나, 다중 공진기 구조의 동적 진동 흡수기를 적용하면 다양한 주파수의 진동을 효과적으로 감소시킬 수 있다. 특히 다중 공진기 유닛을 조합한 구조는 다중 주파수 진동 환경에서 매우 효과적인 방진 성능을 보여준다.

또다른 방법으로는 피팅 자체는 견고하게 고정하되, 외부 진동이 직접적으로 전달되지 않도록 플로팅 마운트나 방진 패드 등을 적용하는 방법도 있다. 이를 통해 고주파 및 저주파 진동 모두에 대응할 수 있다. 진동에 취약한 부위는 소재의 두께를 보강하고, 응력 집중이 발생하지 않도록 곡률을 부여하는 등 구조적 보강 또한 필요하다. 반복 진동에 의한 체결력 저하를 방지하기 위해 페럴의 재질과 경도를 최적화하는 것도 중요하다. 실제로 진동 환경에서의 내구성 평가 결과, 페럴의 재질과 열처리 조건에 따라 체결력 유지 성능이 크게 달라지는 것으로 나타났다.

마지막으로, 방진 구조는 모듈화하여 교체 및 점검이 용이하도록 설계하고, 표준화된 부품을 사용해 다양한 진동 환경에 유연하게 대응할 수 있도록 해야 한다. 이러한 설계 원칙과 방진 구조를 적용함으로써 고압 수소 피팅의 누출 위험을 효과적으로 줄이고, 실제 운송 및 충전 환경에서의 안전성과 신뢰

성을 크게 향상시킬 수 있다는 이익을 얻을 수 있다.

4.2.2 이중 밀폐 구조

이중 밀폐 구조는 두 개의 독립된 피팅을 순차적으로 배치하여, 하나의 피팅이 손상되더라도 이차 밀폐 계면이 내부 수소의 외부 누출을 차단하도록 설계된 구조이다. 구조적으로는 다음과 같은 세부 요소로 구성된다.

1 차 밀폐 계면(primary seal)은 수소의 정상 운전 조건에서 피팅 유지하는 주요 쉘이다. 일반적으로 금속 접촉 방식 또는 페럴 방식이 적용되어 초기 기밀성을 확보한다. 2 차 밀폐 계면(secondary seal)은 1 차 쉘이 압력, 진동 피로, 열적 손상 등으로 인해 기능을 상실했을 경우를 대비한다. 1 차 쉘 뒤에 별도의 금속 피팅, O-ring 등을 배치한다. 피팅 전체의 신뢰성을 고려하여 서로 다른 형태의 메커니즘을 적용하는 것이 일반적이다.

대부분의 이중 밀폐 피팅은 단일 피팅 구조를 기반으로 구성 부품 간 간섭을 최소화하고 조립 공정의 정밀도를 보장하기 위해 노력한다. 이러한 구조는 고압 수소 시스템에서 장기간 운용 시 발생할 수 있는 누설 사고에 대한 구조적 안전을 제공하며, 극한 환경에서도 높은 신뢰성을 유지할 수 있다.

실제 고압가스 산업에서는 이중 밀폐 구조가 사고 예방에 중요한 역할을 해온 사례가 다수 보고되었다. 예를 들어, 미국 화학 플랜트의 고압 수소 배관에서는 단일 쉘 구조를 적용한 피팅에서 미세 누설이 발생해 설비 가동이 중단된 사례가 있었으나, 동일 조건에서 이중 밀폐 구조를 적용한 라인에서는 정상운전을 지속할 수 있었다는 보고가 있다. 또한 항공 우주 분야의 액체수소 배관 시험에서도 1 차 쉘에서 0.1 MPa 수준의 미세 누설이 발생했음에도 2 차 쉘이 이를 완전히 차단하여 외부 방출이 발생하지 않은 결과가 확인된 바 있다. 이러한 사례들은 2 차 쉘이 단순한 보조 장치가 아니라 실제 운용 환경에서 누설 사고를 방지하는 실질적 안전 장치임을 보여준다. 더 나아가 국제 표준(ISO 19880-3, 수소충전소 배관 및 피팅 안전 기준)에서도 고압 수소 시스템의 핵심 부위에는 이중 밀폐 구조를 권장하고 있으며, 이는 반복 진동, 온도 변화, 재질 열화가 동반되는 차량 운행 조건에서 반드시 고려해야 할 설계 요소임을 시사한다.

4.2.3 수소 확산 억제 구조

수소 확산 억제 구조는 누출된 수소가 단시간에 가연성 농도 범위에 도달하지 않도록, 확산 속도와 농도 분포를 제어하는 것을 목적으로 한다. 수소는 분자량이 작고 확산 계수가 커서 누출 직후 빠르게 공기와 혼합되며, 초기 제트에 의한 난류가 결합되면 확산 범위가 짧은 시간 안에 크게 확대된다. 확산 억제 구조는 누출 직후에 위험 구간을 효과적으로 분산시켜 위험 구간의 체적 성장을 지연시킨다.

대표적으로 누출구 주변에 다공성 격자 구조나 미세 그리드를 설치하여 제트의 직진성을 약화시키고, 미세 난류를 유도해 수소를 넓은 영역으로 희석시킬 수 있다. 이 과정에서 초기에 위험 영역이 형성되지 않고 빠르게 농도가 낮아져 폭발 위험이 감소한다. 실제 실험 연구에서도 다공성 구조체를 적용했을 때 연소 하한 농도(4%) 이상이 유지되는 체적이 크게 축소되는 결과가 보고된 바 있다.

또한 배출 방향 제어도 중요한 설계 요소이다. 3.5 확산 특성 정리에서 언급했듯이, 수소가 하향 배출된다면 바닥면을 따라 수소가 체류하면서 위험 구간이 형성되며, 이는 지하주차장이나 터널과 같은 밀폐 환경에서 특히 치명적이다. 따라서 누출 시 가스가 가능한 한 상부로 배출되도록 하는 설계 원칙을 준수해야 한다.

토의 및 결론

본 연구는 수소 에너지 활용 과정에서 발생할 수 있는 고압 저장 및 이송 계통의 누출 문제를 이론적 사례적 실험적 측면에서 고찰하였다. 수소의 특성과 압력 이론, 재료 역학적 요인 분석을 통해 응력 집중, 수소 취성, 체결부 진동 하중이 누출 개시 조건 형성에 중요한 역할을 한다는 점을 확인하였다. 또한 국내외 사고 사례를 통해 수소 누출이 경제적 손실뿐만 아니라 안전 및 환경에도 심각한 영향을 미칠 수 있음을 재확인하였다. 이를 바탕으로 설계한 시뮬레이션은 압력 변화와 진동 조건에 따른 누출 발생 가능성과 확산 거동을 정량적으로

평가하는 데 기여할 수 있었다. 본 연구는 수소 인프라의 안전성 확보를 위한 기초 자료로 활용될 수 있으며, 향후 다양한 작동 환경에서의 장기적 내구성 시험 및 표면 개질 기술과의 결합을 통한 누출 억제 방안 모색이 필요하다. 더 나아가 인공지능 기반의 예측 모델링, 센서 네트워크를 이용한 실시간 감시 체계, 친환경 코팅 소재 적용 등 융합적 연구를 통해 수소 사회의 안전성 확보에 기여할 수 있을 것이다.

REFERENCES

- [1]. 서민형, 정찬호 심희준 외 2 인 (2022). 수소버스용 TPRD 안전성 성능 평가를 위한 장비개발 및 시험방법
- [2]. 오준석 (2021). 반응표면법을 이용한 FCEV 용연료 파이프 메탈 실링부 형상 최적설계
- [3]. 박우일, 윤진희 강성규 (2021). 수소충전소 튜브트레이일러 누출에 따른 위험성평가
- [4]. 이도현, 김동규 (2023). 수소충전 상황을 고려한 수소충전용 디스펜서 내 피팅부 오링 거동에 대한 수치해석적 연구
- [5]. 최진욱, 이용남, 박철우 외 2 인 (2016). 누출공 크기에 따른 밀폐공간 내 수소 가스의 확산 특성
- [6]. 김태용, 이동식 수소 충전 장비용 100 MPa 급 고압 피팅의 진동 해석, 한국수소및신에너지학회지, 2023
- [7]. 한국산업기술시험원, “수소충전용 장비 및 부품” 기술 동향 보고서, 2024.08.06.
- [8]. 한국화학융합시험연구원(KCODIL), “수소연료전지차 수소관로부 취성개선 및 안전성 평가”, 2022.
- [9]. 한국산업안전보건공단, “수소충전소의 안전에 관한 기술지침”, 2021 년 12 월.