

연료전지 자동차용 질소/응축수 통합배출시스템 및 기술 개발

심효섭[†] · 김효섭 · 김재훈 · 권부길 · 이현준 · 김치명 · 박용선
현대자동차

Development of the Integrated Exhaust System and Techniques of Nitrogen and Condensate for Fuel Cell Electric Vehicle

HYO SUB SHIM[†], HYO SUB KIM, JAE HOON KIM, BU KIL KWON, HYUN JOON LEE,
CHI MYUNG KIM, YONG SUN PARK

Hyundai Motor Company, 104, Mabuk-dong Giheung-gu, Youngin-si, Gyeonggi-do, 446-912, Korea

Abstract >> Proper discharge of nitrogen gas and water condensate is required in a conventional fuel cell system for performance, stability and durability of fuel cell stacks. Present study covers the development of integrated unit and its functioning logic for simultaneous nitrogen gas purge and water condensate drainage in a fuel cell vehicle system. Configuration of condensate drainage pipe, purge valve and level sensor is considered and optimized in physical integration. As a key factor, discharge time is considered and optimized based on the test result of constant-current operation with various operating temperature in logic development. Consequently, derived optimal values are applied and verified in actual vehicle drive mode test. Increase of system design flexibility, weight reduction and cost reduction are anticipated with this study. Additional study for physical and logical improvement is currently being implemented.

Key words : Nitrogen purge(질소 배출), Condensate drainage(응축수 배출), Electrochemical reaction(전기화학반응), Fuel cell(연료전지), Constant-current driving test(정전류 운전 시험)

1. 서 론

화석 연료 사용에 따른 환경 오염 문제와 지구 온난화 문제의 해결 방안으로 친환경 자동차 개발이 전 세계적으로 부각되고 있는 가운데, 최근 수소연료전지 자동차가 핫 이슈로 떠오르고 있다. 특히, 한국을 포함한 일본, 미국, 독일 등 세계 유수의 자동차 메이커들이 수소 연료전지 자동차 분야의 기술 선점

을 위하여 점차적으로 개발에 열을 올리고 있다.

수소연료전지 자동차는 Fig. 1에 나타낸 것처럼 연료전지 시스템 내에서 수소와 공기가 반응하여 발생된 전기에너지를 이용하여 구동한다. 이 때, 부산물로 공기극에서는 물이 생성되고, 그 중 일부가 공기극에서 반응하지 않고 축적되어 있는 질소와 함께 고분자 전해질 막을 통하여 연료극으로 이동해 온다¹⁻⁵⁾. 이 질소와 생성수는 수소 공급 시스템을 통하여 재순환되는데, 그 과정에서 질소 가스는 수소와 함께 주기적으로 질소 퍼지 장치를 통하여 시스템 외부로

[†]Corresponding author : a78bluekite@hyundai.com

[접수일 : 2014.07.23 수정일 : 2014.09.30 게재확정일 : 2014.10.31]

Copyright © 2014 KHNES

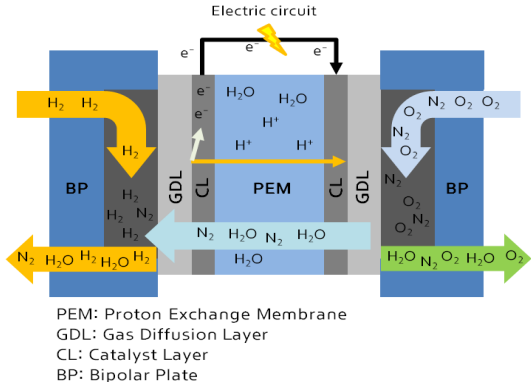


Fig. 1 Structure of the fuel cell

배출되고, 생성수 중 일부는 Fig. 2에 나타난 응축수 저장 장치(W/Trap)에 저장되었다가, 연료전지 시스템에의 구성에 따라 시스템 외부로 배출되거나 공기극 가슴을 위하여 활용된다⁶⁾.

연료전지시스템의 연료극에서 수소 이외의 성분이 증가할 경우 연료극의 수소 농도가 낮아져, 시스템에서 요구하는 출력을 낼 수 없기 때문에 주기적인 질소 퍼지를 통하여 수소 농도가 일정 수치 이상을 유지되도록 하는 것이 매우 중요하다. 또한, 시스템 내부의 응축수가 원활히 제거되지 않을 경우 스택 분리판을 통해 이동해야 하는 연료(수소)의 흐름이 방해받아 차량이 요구하는 출력을 만들 수 없기 때문에 응축수도 주기적으로 배출해 주어야 한다. 그래서 항상 연료전지시스템에서는 수소 농도와 물 관리가 매우 중요하게 여겨진다.

2. 본 론

2.1 질소/응축수 통합 배출 시스템 개발 배경

연료전지시스템이 요구하는 출력을 안정적으로 유지하기 위해서는 수소 농도와 물 관리가 필요하고, 이를 위해 수소 공급 시스템 내에 질소 퍼지 장치와 응축수 배출 장치가 구성된다. 기존 시스템의 경우 Fig. 2에 나타난 것과 같이 이 두 장치가 별도로 구성

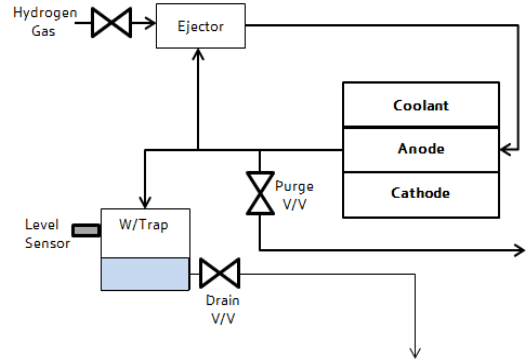


Fig. 2 Anode layout in conventional system

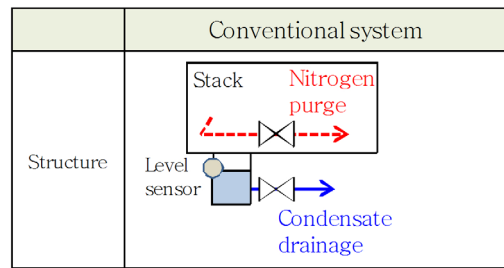


Fig. 3 Structure of the conventional system

되어 각각의 역할을 수행하였다. 일반적으로 질소 퍼지 장치는 Fig. 3에 나타난 것과 같이 연료전지 모듈(스택)의 하단보다 높은 위치에 구성되어 주로 가스 성분들이 배출될 수 있도록 되어 있다.

반면, 응축수 처리 장치는 연료극 내의 응축된 물을 제거하는 것이 목적이기 때문에 재순환 가스의 이동 경로 상에 설치하여 중력에 의해 아래방향으로 떨어지는 물을 저장하도록 하였다. 이 응축수 처리 장치는 중력에 의해 떨어지는 물을 저장할 수 있는 응축수 저장 용기 외에 지정된 수위를 넘지 않도록 조절하기 위하여 저장용기 외부에 장착된 수위센서, 그리고, 물을 배출 시켜줄 수 있는 응축수 배출 밸브로 구성된다.

응축수가 배출되는 방식은 다음과 같은 절차를 거치게 되는데, 우선 시스템이 운전을 하게 되면 응축수가 응축수 저장 용기로 유입이 되고, 수위센서가 장착된 위치까지 물이 차올라 센서가 물이 있다는

신호를 제어기에 전달하게 된다. 그러면 제어기는 응축수 밸브가 지정된 시간 동안 개방되도록 명령을 내린다. 이 지정된 시간은 최대한 응축수만을 배출하도록 제어적으로 구성된 시간이다. 이 시간을 초과하여 배출을 하게 될 경우 수소 가스가 배출될 수 있기 때문에 연비와 안전성 면에 있어서 문제가 될 수 있다.

이처럼 기존 시스템에서는 질소퍼지장치와 응축수 배출장치가 별도로 구성이 되어 각각의 다른 역할을 수행하였다. 하지만, 가스와 응축수라는 서로 다른 유체를 배출하는 것 이외에는 기능적으로 매우 유사하기 때문에 응축수 배출 시스템에 질소퍼지 기능을 통합시키는 방향으로 개발을 진행하게 되었다.

이를 통하여 기존에 사용되었던 밸브의 사용 개수를 줄일 수 있고, 질소 퍼지 시스템 구성이 불필요해지기 때문에 시스템의 단순화와 패키지의 효율성을 높일 수 있을 것이다. 그리고, 무엇보다 시스템 경량화와 원가 절감 효과를 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

2.2 질소/응축수 통합 배출 시스템 구조 및 제어 로직

질소와 응축수를 통합하여 배출하는 시스템의 레이아웃과 구조 및 제어로직은 Fig. 4와 Fig. 5에 각각 나타내었는데, 앞서 언급하였던 것처럼 응축수 배출 시스템에 질소 퍼지 기능을 추가시킬 수 있는 구조로 검토되었다. 이를 위해서 응축수 저장용기가 기존

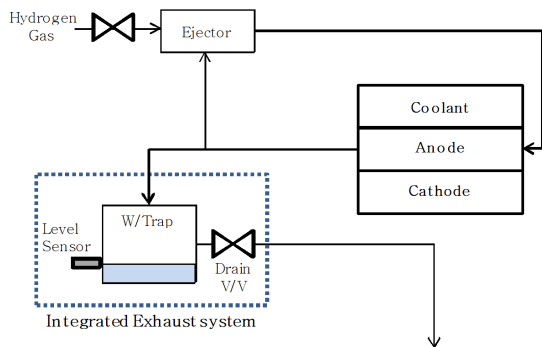


Fig. 4 Anode layout of the integrated exhaust system

과 다르게 구성될 필요가 있었다. 가장 중요한 부분은 응축수 저장용기의 바닥 면과 맞물려 수평하게 구성되었던 응축수 배출 유로를 Fig. 6과 같이 윗 방향으로 구성시키고, 배출유로의 말단 형상을 대각방향으로 긴 타원형으로 만들어 응축수가 어느 정도 배출된 후 연료극 재순환 가스가 배출될 수 있도록 하였다. 이러한 구성은 동절기 잔류 응축수에 의하여 배출유로가 막히는 문제를 해결할 수 있는 매우 효과적인 방안이다. 동절기 잔류 응축수에 의해 배출유로가 막히게 되면, 시동 초기에 질소 퍼지를 수행하지 못하여 시동 불량 문제가 발생할 수 있는데, 이를 예방할 수 있는 방안이다.

한편, 배출 밸브의 위치는 저장 용기 바닥 면 보다 높게 위치시켰는데, 이 부분 역시 동절기 밸브 작동 불량 문제를 개선하기 위한 방안으로 반영된 구성이다. 밸브가 하단에 위치할 경우 밸브 내부로 유입된 응축수에 의하여 밸브의 즉각적인 작동이 쉽지 않을 수 있다. 질소 퍼지 장치의 경우 시동 초기 즉시 구동 가능한 수준의 동작성이 기본적으로 요구되기 때문에 이 부분을 충족시키기 위해서는 밸브 내부 유로

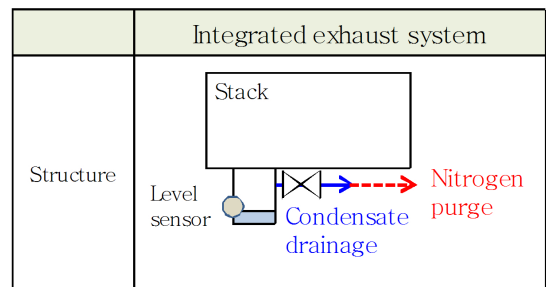


Fig. 5 Structure of integrated exhaust system

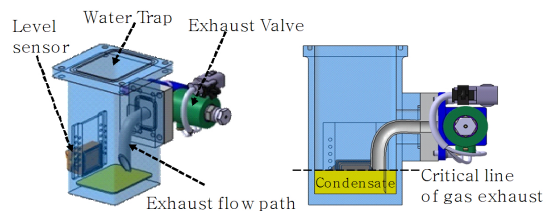


Fig. 6 Detailed structure of the integrated exhaust system

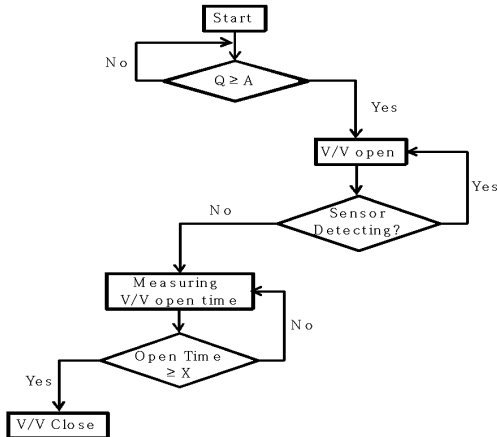


Fig. 7 Control logic of the integrated exhaust system

상에 응축수가 최대한 포함되지 않는 것이 매우 중요하다. 그렇기 때문에 잔류 응축수가 밸브 내부로 유입되지 않도록 하기 위하여 밸브 위치를 기존 대비 높은 곳에 구성하였다.

수위센서의 경우도 기존 시스템과 다르게 장착 위치가 변경되었는데, 기존 시스템 대비 아래쪽으로 구성하였다. 이는 센서의 역할이 기존과 달라졌기 때문인데, 기존에는 수위센서가 물이 지정된 위치까지 올라오는 것을 감지하는 역할을 수행한 반면, 통합 배출 시스템에서는 물이 지정된 위치까지 내려올 경우 질소가 배출되는 시점을 알려주는 역할을 하도록 하였다. 다시 말해서, 수위센서가 장착되는 위치가 가스가 배출되는 위치이다. 이 부분은 응축수 저장 용기(위터트랩) 내에 있는 통합 배출 유로의 형상과 관련된 부분으로 이 둘은 매우 유기적으로 설계되어야 한다.

상기와 같이 구성된 시스템으로 기존과 동등 수준을 효과를 얻는 것이 본 시스템 개발의 주요 목표이다. 이를 위해서는 새로운 배출 로직의 개발이 필요하였고, Fig. 7에 도시된 로직을 제안할 수 있었다.

기존 시스템의 경우 연료전지 시스템 내부에서 생성되는 불순물의 양이 전류 소모량에 따라 증가한다는 가정 하에 전류 적산 값을 기준으로 불순물을 제

거하도록 질소 배출 로직이 구성되어 있었다. 기존과 동등 수준의 수소 농도를 유지하기 위하여 신규 개발된 로직에도 이를 반영하여 기존과 동일한 전류 적산 값 기준으로 밸브를 개방하도록 구성하였다. 전류 적산 값은 로직에서 Q로 명시하였고, 밸브를 개방하기 위한 전류 적산 값은 연료전지 시스템에 따라 달라질 수 있는데, 로직 상에서는 이 값을 A로 표시하여, 전류 적산 값(Q)이 지정된 A값을 초과하는 시점에서 통합 배출 기능이 작동하도록 하였다. 여기서, 전류 적산 값의 단위는 쿨롱[C]이다.

이어서, 로직을 상세히 설명하면 다음과 같다. 우선 앞서 언급하였던 것처럼 전류 적산 값이 A값에 도달하면, 응축수 밸브는 개방이 되고, 수위 센서가 장착되어 있는 위치인 가스 배출 임계점 상에 물이 있는 지 여부를 수위센서에서 확인한다. 만약 물이 있다고 수위센서가 판단을 하게 되면, 밸브는 개방된 후 센서가 물이 없다고 판단할 때까지 밸브 개방을 유지하고, 그 이후부터 밸브 개방 시간을 측정하면서, 로직 상에 반영된 X값에 도달할 때까지 추가적으로 밸브를 개방한다. 이 X값에 해당하는 시간만큼 질소 퍼지를 수행하게 되는 것이다. 이 때, 가스만 배출되는 것이 아니고, 물이 함께 배출되기 때문에 기존과 동등 수준의 질소 퍼지 효과를 얻기 위해서는 기존 대비 밸브 개방 시간이 커져야 한다는 것을 예상할 수 있다. 한편 로직에서 전류 적산 값(Q)이 A값에 도달하였을 때, 수위센서가 물을 감지하지 않는 경우도 있을 수 있는데, 이 경우 물은 가스 배출 임계점 이하에 위치하고 있기 때문에, 로직 상에 반영된 X값에 해당하는 시간만큼만 밸브를 개방해 준다.

로직 상의 지정되지 않은 A와 X값은 연료전지 시스템 별로 최적 값이 다를 수 있기 때문에, 이 부분은 시험을 통하여 시스템 별로 최적 값을 찾아가야 한다. 본 연구의 주요 목적이 바로 이 최적 값을 찾아내어 기존과 동등 수준의 질소 퍼지와 응축수 배출 성능을 확보하는 것이다.

2.3 질소/응축수 통합 배출 시험

기존 시스템과 동등 수준의 질소 퍼지 및 응축수 배출 효과를 구현하기 위해 개발된 질소/응축수 통합 배출 로직의 미 확정 변수에 대한 최적 값을 도출하기 위한 시험과 로직의 실차 적용 가능성을 검증하기 위한 시험이 진행되었다. 이 때, 전류 적산 값 (A)은 기존 시스템과 비교하기 위하여 기존 시스템에 사용된 값과 동일한 값으로 설정하였다.

우선 최적 값 도출을 위해서 정전류 운전 평가를 진행하였고, 실차 적용 가능성을 확인하기 위해서 도심 주행 모드와 고속 주행 모드를 대표하는 실차 주행 모드인 UDSS(Urban Dynamometer Driving Schedule) 모드와 US06모드로 평가를 진행하였다. UDSS 모드는 주행시간이 1,369초, 주행거리가 12.07km, 평균속도와 최고속도가 각각 31.5km/h, 91.2km/h의 이고, US06 모드는 주행시간이 596초, 주행거리가 12.8km, 평균속도와 최고속도가 각각 77.9km/h, 129.2km/h인 모드이다.

시험 장치는 Fig. 8에 나타난 것과 같이 100kW급 스택이 사용되었고, 그 하부에 질소/응축수 통합 배출 시스템을 구성한 후 시스템 외부로 배출되도록 연결하였다. 그리고 수소 공급단에는 수소 유량계를 장착하여 질소 퍼지 시 배출되는 수소의 양을 측정

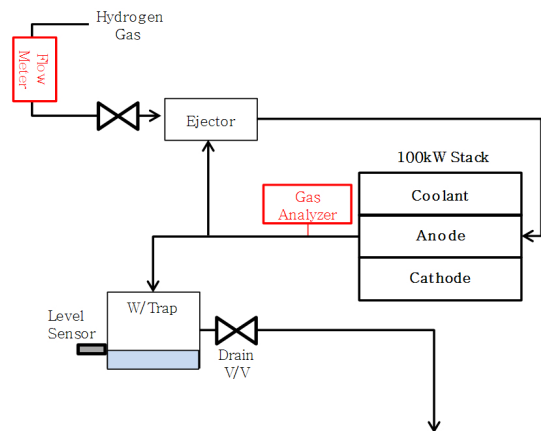


Fig. 8 Test equipments of the integrated exhaust system

할 수 있도록 하였고, 연료극 출구 부에 수소 농도를 측정할 수 있도록 가스 분석기를 구성하였다.

2.3.1 정전류 운전 평가

2.3.1.1 시험 방법

정전류 운전 평가는 최대 약 75kW 범위의 출력까지 수행하였고, 이 때, 밸브 개방시간은 0.5초, 0.9초, 1.1초, 1.3초로 하였다. 또한, 운전 온도의 영향을 살펴 보기 위해 운전온도 A($30\pm 5^{\circ}\text{C}$), 운전온도 B($60\pm 5^{\circ}\text{C}$), 운전온도 C($70\pm 5^{\circ}\text{C}$)의 조건에서 진행하였다. 본 시험을 통하여 각 Case 별로 수소 농도와 수소 배출량을 확인하였고, 기존과 동등 수준의 질소 퍼지 효과를 나타내는 최적 배출 시간(X)을 찾고자 하였다.

2.3.1.2 시험 결과

시험 결과는 Fig. 9~11에 나타내었다. 운전온도 A 조건의 경우는 하기 Fig. 9에 나타난 것처럼 1.3초의 밸브 개방 시간이 전 전류 영역에서 가장 적당한 값을 나타내었다. 1.1초의 결과 값도 1.3초의 값과 큰 차이 없이 기존 시스템과 동등한 수준의 값을 나타내고 있음을 확인할 수 있다. 이 때 배출되는 수소의 양은 1.3초 배출 시간 기준으로 Load가 40%미만에서는 약 1.7~2.6L 수준이고, 40%이상에서는 약 2.3~3.9L 범위로 전류가 증가할수록 선형적으로 증가하는 경향을 가진다.

운전온도 B의 경우에는 Fig. 10에 나타난 것과 같이 Load가 20%이하에서는 약 1.1초의 밸브 개방 시간이 가장 적당한 값이지만, Load가 40%이상에서는 1.3초의 밸브 개방시간이 가장 적당하다는 것을 확인할 수 있고, 전체 전류 구간을 고려하였을 경우 1.3초의 값보다는 1.1초의 값이 더 타당한 값이라는 것을 확인할 수 있다. 이 때 배출되는 수소의 양은 1.1초 배출 시간 기준으로 Load가 40%미만에서는 약 1.5~1.8L 수준이고, Load가 40%이상에서는 약 1.5~2.2L 범위를 가진다.

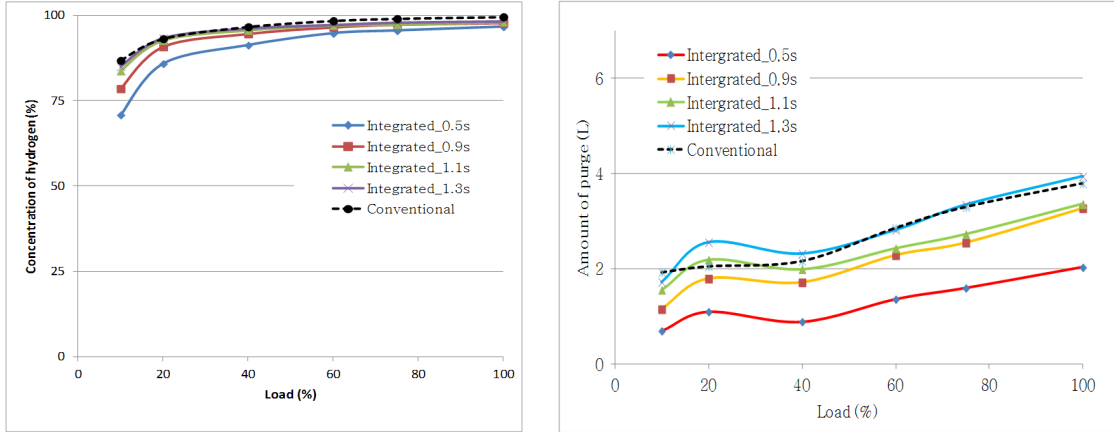


Fig. 9 Results of the constant-current driving mode(@Operating temperature A)

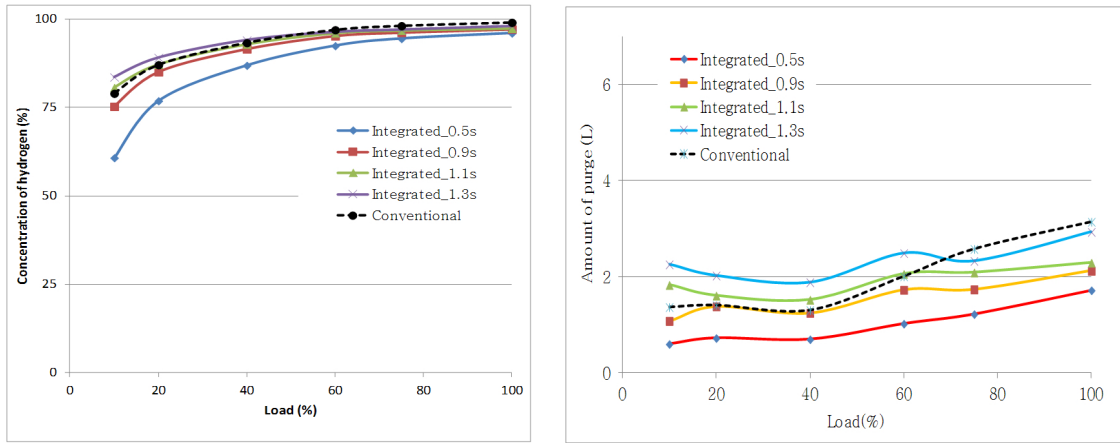


Fig. 10 Results of the constant-current driving mode(@Operating temperature B)

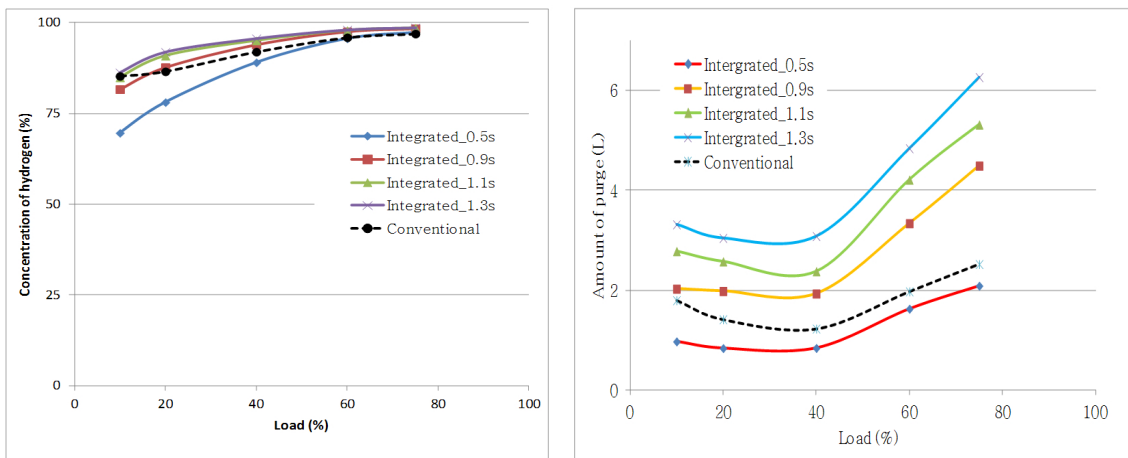


Fig. 11 Results of the constant-current driving mode(@Operating temperature C)

마지막으로 운전 온도 C의 경우에는 Fig. 11의 결과로 판단하였을 때 약 0.9초의 밸브 개방 시간 값으로도 기존과 동등한 수준의 질소 퍼지 효과를 얻을 수 있다는 것을 확인할 수 있다.

이 때 배출되는 수소의 양은 0.9초 배출 시간 기준으로 Load가 40%미만에서는 약 1.9~2.0L 수준이고, Load가 40%이상에서는 약 1.9~4.5L 범위를 가진다.

정전류 운전 평가를 통하여 운전 온도에 따라 통합 배출 로직 상에서 가스가 배출될 수 있는 개방 시간(X)값이 달라질 수 있다는 것을 확인할 수 있었다. 운전 온도 A의 경우는 1.3초, 운전온도 B의 경우는 1.1초, 마지막으로 운전온도 C의 경우는 0.9초가 가장 적당한 값이라는 결과를 얻을 수 있었는데, 이는 운전 온도가 높아지게 되면, 연료전지시스템의 연료극 내 응축수량이 감소하여 통합 배출 시 가스와 함께 배출되는 응축수의 양이 상대적으로 작아졌기 때문으로 판단된다. 여기서 응축수가 가스가 배출되는데 있어 저항의 역할을 한다고 볼 수 있다.

2.3.2 실차 주행 모드 운전 평가

2.3.2.1 시험 방법

정전류 평가를 통하여 도출된 운전 온도 별 개방 시간인 X값을 이용하여 실차 주행 모드 평가를 실시하였다. 실차 주행 모드 중 도심 주행 모드와 고속 주행 모드를 대표하는 UDDS모드와 US06모드 운전을 수행하여 운전 중 수소 농도가 최소 어느 정도까지 유지되는지와 운전 중 연료전지시스템의 출력 및 안전성에 문제가 없는지를 확인하고자 하였다.

우선 운전 온도 B의 경우에는 두 모드에 대해 평가를 진행하였고, 운전온도 A의 경우는 UDDS모드, 운전온도 C의 경우는 US06모드에 대해 평가를 진행하였다.

2.3.2.2 시험 결과

실차 주행 모드 운전의 평가 결과는 하기 Table 1

에 나타난 것과 같이 모든 운전 온도 조건에서 연료극 출구 측 수소 농도가 최소 80% 이상을 유지하였다. 운전온도 B의 시험 결과를 보면, UDDS모드 대비 US06 모드의 수소 농도가 높은 값을 나타내었는데, 그 이유는 US06모드의 전류가 평균적으로 UDDS 모드 대비 높기 때문에 짧은 시간 주기로 질소 퍼지가 이루어져 순도가 높은 수소가 연료전지 모듈 내부로 자주 공급되기 때문인 것으로 판단된다. Fig. 12과 Fig. 13를 살펴보면, 운전 시간 약 600초 기준으로 UDDS모드의 밸브 개방 횟수가 6회인 반면, US06모드의 개방 횟수는 17회로 약 3배 정도 상회하는 것을 확인할 수 있다. 그리고 두 그래프에서 수소 농도의 변화 추이를 살펴보면, UDDS 모드의 경우 약 500초를 기준으로 그 이전까지는 평균적인 전류의 값이 커서 소모되는 수소의 양이 질소 퍼지를 통해 공급되는 수소의 양보다 많아 수소 농도가 점차 낮아지다가 그 이후부터 전류 값이 줄어들면서 소모되는 수소의 양과 질소 퍼지를 통해 공급되는 수소의 양이 평형을 이루면서 수소 농도가 일정 범위 내에서 유지되는 것을 확인할 수 있다. 그리고 밸브 개방 시점에 수소 농도가 일시적으로 상승하는 것을 확인할 수 있었는데, 이것은 밸브 개방에 의해 새롭게 공급된 순도 높은 수소가 스택 내 잔존수소의 농도 상승에 상대적으로 큰 영향을 준 것으로 생각할 수 있다. 반면 US06모드의 경우는 운전 초기부터 밸브가 자주 개방되었기 때문에 수소 농도가 낮아질 틈도 없이 새롭게 공급되는 수소에 의해 수소 농도가 일정 범위 내에서 유지되는 것을 확인할 수 있었고, 특히

Table 1 Results of actual vehicle driving mode

Driving mode	Exhaust time (X)	Min. Concentration of H ₂
US06@Temp. A	1.3s	90.5%
UDDS@Temp. B	1.1s	80.5%
US06@Temp. B	1.1s	88.1%
UDDS@Temp. C	0.9s	80.9%

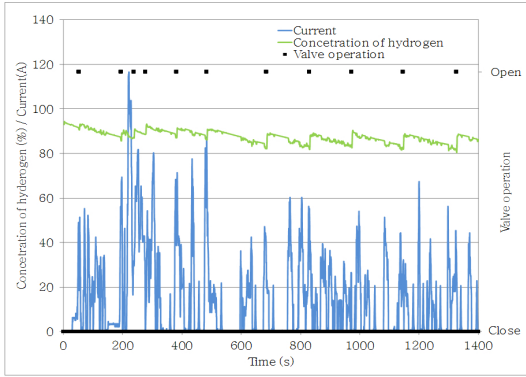


Fig. 12 Result of UDDS mode (@Operating temperature B)

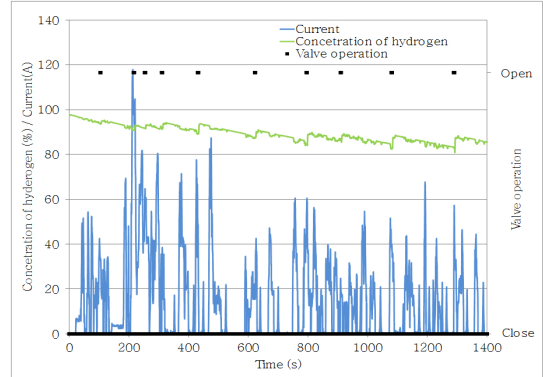


Fig. 14 Result of UDDS mode (@Operating temperature A)

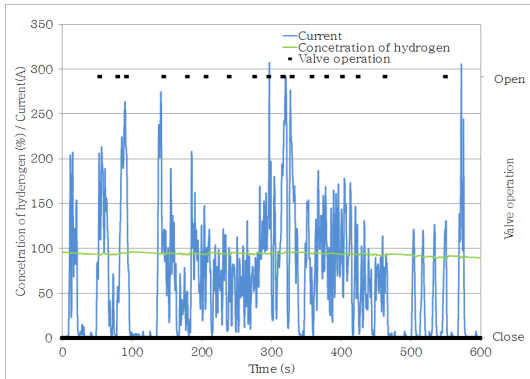


Fig. 13 Result of US06 mode (@Operating temperature B)

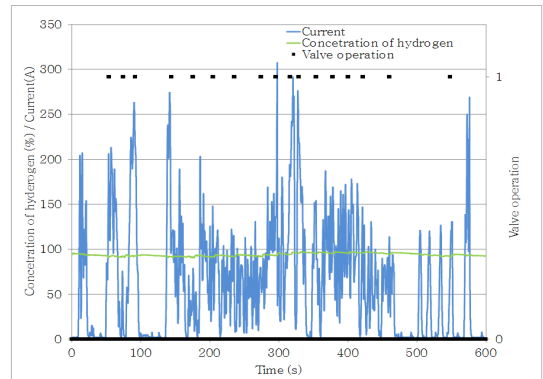


Fig. 15 Result of US06 mode (@Operating temperature C)

밸브 개방이 자주 이루어지는 구간에서는 수소 농도가 오히려 상승하는 것을 확인할 수 있었다.

운전 온도 A, C의 경우는 두 모드에 대하여 시험을 수행하지 못하였지만, 운전온도 B의 시험결과로 유추하여 보았을 때 두 운전 온도 모두 UDDS와 US06모드에 대하여 최소 80%이상의 수소 농도를 유지할 수 있을 것으로 예측된다.

마지막으로 실차 주행 모드 운전 중에 스택 출력 성능 및 안전성에 대하여 모니터링 하였는데, 특별히 스택 성능이 저하되거나, 스택 운전에 문제가 되는 부분은 발생하지 않았다. 즉, 질소/응축수 통합 배출 시스템에 대한 실차 적용 가능성이 확인되었다고 볼 수 있다.

3. 결론

연료전지시스템에서 개별적으로 수행되던 질소 퍼지와 응축수 배출 기능을 하나의 장치에서 수행될 수 있도록 하는 기술이 본 연구를 통하여 개발되었다. 질소/응축수 통합 배출을 위하여 기존 시스템의 구성 일부를 변경하였고, 배출 로직을 새롭게 구성하였다. 로직 내에 있는 중요 변수인 밸브 개방 시간에 대해서는 정전류 운전 시험을 통하여 최적 값을 도출하였고, 이 수치를 로직에 적용한 후, 도심 주행 및 고속 주행 모드의 실차 주행 모드 운전 평가에서 차량 적용 가능성을 검증할 수 있었다. 본 연구를 통하여 얻은 결과 및 효과들을 정리하면 다음과 같다.

- 1) 질소/응축수 통합 배출 로직의 최적화를 위한 Know-how 및 Reference data를 확보할 수 있었다. 특히 운전 온도에 대한 영향은 향후 시스템 운전 온도 변경 시 유용하게 활용될 수 있을 것으로 예상된다.
- 2) 질소/응축수 통합 배출 시스템 개발을 통하여 질소 퍼지 기능을 수행하던 부품의 삭제가 가능할 수 있다. 그 결과 기존 대비 수소 공급 시스템의 가격을 절감시킬 수 있고, 경량화 효과도 얻을 수 있을 것으로 보인다.
- 3) 질소 퍼지 밸브의 경우 기존 시스템에서 스택 하부보다 높은 위치에 구성되었고, 유지 보수성 확보를 위하여 충분한 작업 공간이 필요하였다. 부품이 삭제될 경우 단품 및 시스템 설계 소요되는 인력 및 시간, 개발비 등의 절감효과를 얻을 수 있고, 상대적으로 타 부품의 설계 자유도가 개선되어 전체 시스템 설계에 있어서 상당한 개선 효과를 줄 수 있을 것으로 보인다.

References

1. James Larminie, "Fuel Cell System Explained", John Willy and Sons, 2003.
2. Ryan O'hayre, Suk-Won Cha, Whitney Colella, "Fuel Cell Fundamentals", John Wiley&Sons, 2009.
3. F. Barbir, "PEM Fuel Cells: Theory and Practice", Elsevier, 2005.
4. W. Vielstich, A. Lamm, H. A. Gasteiger, "Handbook of Fuel Cells: Fundamentals", John Wiley& Sons, 2005.
5. J.Y. Park, S.J. IM, K.I. Han, B.K. Hong, "A Study to Simulate Cell Voltage-Reversal Behavior Caused by Local Hydrogen Starvation in a Stack of Fuel Cell Vehicle", Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol. 24, No. 4, 2013, pp. 311-319.
6. J.H. Kim, Y.G. Noh, U.S. Jeon, J.H. Lee, "Modeling of Hydrogen Recirculation System for Fuel Cell Vehicle", Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol. 22, No. 4, 2011, pp. 481-487.