

# 연료전지 자동차 내 수소 공급 시스템에서 드레인 밸브 특성에 따른 드레인 로직 최적화 및 연비와 운전안정성을 고려한 물 관리 전략 개발

안득균<sup>†</sup> · 이현재 · 심호섭 · 김대중  
현대자동차

## Optimization of Condensate Water Drain Logic Depending on the Characteristics of Drain Valve in FPS of Fuel Cell Vehicle and Development of Anode Water Management Strategy to Achieve High Fuel Efficiency and Operational Stability

DEUKKUEN AHN<sup>†</sup>, HYUNJAE LEE, HYOSUB SHIM, DAEJONG KIM

Hyundai Motors Company, Mabuk-ro 240beon-gil, Giheung-gu, Yongin-si, Gyeonggi-do, 16891, Korea

**Abstract** >> A proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) produces only water at cathode by an electrochemical reaction between hydrogen and oxygen. The generated water is transported across the membrane from the cathode to the anode. The transported water collected in water-trap and drained to the cathode within the humidifier outlet. If the condensate water is not being drained at the appropriate time, condensate water in the anode can cause the performance degradation or fuel efficiency degradation of fuel cell by the anode flooding or unnecessary hydrogen discharge. In this study, we proposed an optimization method of condensate water drain logic for the water drain performance and the water drain algorithm as considered the condensate water generating speed prep emergency case. In conclusion, we developed the water management strategy of fuel processing system (FPS) as securing fuel efficiency and operating stability.

**Key words** : Fuel cell(연료전지), Anode condensate water(연료극 응축수), Water management(물 관리), Drain logic(드레인 로직), Drain valve(드레인 밸브)

### Nomenclature

$i$  : current density, A/cm<sup>2</sup>  
 $P$  : pressure, bar

### 1. 서 론

차량용 고분자 전해질 연료전지는 수소와 산소의 전기화학반응을 통해 화학에너지를 전기에너지로 전환하는 에너지 전환 시스템으로 기존의 내연기관 엔진에 비해 효율이 높으며, 화학반응의 부산물로 물이 생성되는 친환경 시스템이다. 수소와 산소의 전기화

<sup>†</sup>Corresponding author : dkAhn@hyundai.com

Received: 2016.3.29 in revised form: 2016.4.11 Accepted: 2016.4.30

Copyright © 2016 KHNES



Fig. 1 LM FCEV Power Module Complete (PMC)

학반응에 의해 공기가 공급되는 공기극에 반응의 생성물로서 물이 생성된다. 이렇게 생성된 물의 대부분은 스택 외부로 배출되거나, 가슴기에 모이게 되어 스택에 공급되는 저온의 건조한 공기를 고온 다습한 공기로 만드는 열 및 물질교환에 이용된다. 그 외의 생성수는 연료극과 공기극의 농도 차에 의해 고분자 전해질 막을 통해 연료극으로 이동하게 되고, 수소가 재순환되는 연료극 시스템 내에서 수소와 함께 순환하게 된다<sup>1)</sup>.

Fig. 1에 현 연료전지 투싼(LM FCEV) 차량에 탑재되는 연료전지 시스템(Power Module Complete, PMC)을 나타내었다. LM FCEV PMC는 고분자 전해질 막과 양 옆으로 연료극 및 공기극으로 구성된 연료전지를 전기적으로 직렬로 연결한 스택과 연료전지 시스템의 운전을 위한 운전장치(Balance of Plant, BOP)로 구성되어 있다. BOP는 크게 공기 공급 시스템(Air Processing System, APS), 수소 공급 시스템(Fuel Processing System, FPS), 열 관리 시스템(Thermal Management System, TMS)로 구성되어 있다. 수소 탱크로부터 FPS에 공급된 수소는 수소 차단 밸브 및 압력제어를 위한 솔레노이드 밸브를 거쳐 연료전지 스택에 공급되어 전기화학반응을 일으키게 된다. 재순환블로워를 이용한 수소 재순환 시스템이 적용되어 있기 때문에 전기화학반응에 이용되지 않은 수소는

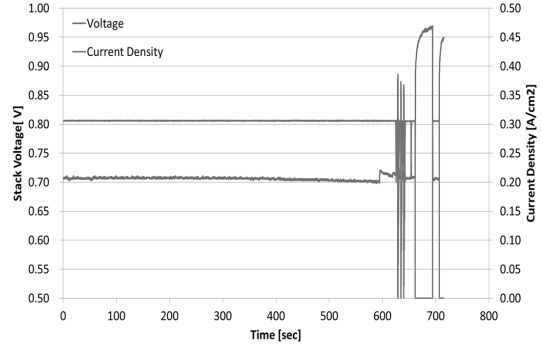


Fig. 2 Power limit by not draining condensate water

재순환블로워에 의해 다시 연료극 입구측으로 재공급되어 연료극을 순환하게 된다. 이 때 공기극에서 생성된 물 및 전기화학반응에 참여하지 않는 질소가 전해질 막을 통해 연료극으로 이동하게 된다. 이렇게 연료극으로 이동된 질소 및 물 등의 불순물을 연료극 외부로 배출시키기 위하여 주기적으로 수소 퍼지 밸브를 개방함으로써 연료극내의 질소를 배출시키고, 연료극을 순환하는 응축수를 워터트랩에 모으고 일정량 도달하게 되면 수위센서가 이를 감지, 드레인 밸브를 통해 공기극의 가슴기측에 응축수를 배출한다.

연료극 내의 워터트랩, 드레인 밸브 등과 같은 물 배출 관련 부품들의 설계 사양이 변경되면, 드레인 밸브의 개방 시간 및 조건 등도 조정되어야 한다. 연료극 내의 응축수가 적절한 시점에 배출되지 못하면 연료극 내부의 수소 공급 문제를 일으킬 수 있다. 이러한 연료극의 수소 공급 부족은 연료전지의 성능 및 내구성에 매우 치명적인 악영향을 미치는 것으로 알려져 있다<sup>2-4)</sup>. 이와는 반대로 응축수를 제거하기 위하여 드레인 밸브를 지나치게 오래 개방하게 되면 응축수가 아닌 수소가 배출되어 공기극 내 수소가 누적되어 연료전지 차량의 안전성 문제 및 수소 사용량 증대로 인한 연비저하의 문제를 일으킬 수 있다<sup>5,6)</sup>.

Fig. 2는 LM FCEV PMC에서의 실험결과로 기본 운전온도 및 정상조건에서 정전류( $i=0.32A/cm^2$ )로 10분 이상 인가하였을 때 드레인 밸브가 작동하지

않은 경우를 나타낸다. 이때 연료극내의 응축수가 적절한 시점에 배출되지 못해 연료극 내부로 응축수가 누적되어 수소 공급 유로를 막아 발생하는 flooding 현상으로 인해 스택의 일부 셀에서 셀 전압 저하 현상이 발생하여 연료전지 시스템의 출력제한이 발생한 것을 알 수 있다.

본 논문에서는 연료극 드레인 밸브의 사양 변경에 따른 검증 프로세스 및 이에 따른 운전 로직 최적 설계의 사례를 다루었으며, 또한 물 관리에 대한 fail-safety 전략으로서 운전온도 별 응축수 생성속도를 도출하여 비상 시 적절한 응축수 배출 시기를 결정하였다. 이러한 방법을 통해 연료전지 차량의 연비와 운전안정성을 동시에 고려한 연료극 내 물 관리 전략을 도출하고자 하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1 정상조건에서의 연료극 응축수 배출량

연료전지 시스템에서 연료극 응축수 배출을 위한 제어변수는 1) 드레인 밸브 전/후단 차압, 2) 드레인 밸브의 개방시간(드레인 밸브 닫힘 시점 지연)으로 구성된다. LM FCEV의 경우 드레인 밸브를 개방하게 되면 연료극의 응축수가 공기극 출구측 가습기에 배출된다. 따라서 응축수 배출을 위한 제어 변수 중 드레인 밸브 전/후단 차압은 결국 연료극 출구측 압력과 공기극 출구측간의 차압이 된다. 드레인 밸브를 통해 응축수가 배출됨에 따라 워터트랩 내 수위가 감소하게 되고, 수위센서가 응축수를 더 이상 감지하지 않게 되면 드레인 밸브는 닫히게 된다. 워터트랩 구조 상 수위센서가 워터트랩의 상부에 위치하기 때문에 워터트랩에는 응축수가 항상 존재하게 된다. 따라서 드레인 밸브를 통해 수소가 배출되지 않는 한도에서 드레인 밸브의 개방시간을 수위센서 off 이후 추가로 더 개방할 수 있다.

본 실험에서는 드레인 밸브의 유량계수가 감소한 경우 응축수 배출성능을 확보하기 위해 드레인 밸브

**Table 1** Test condition of anode condensate water drain

Test parameter	Measurement
Pressure difference of drain valve	A quantity of average condensate water per one time by current
Valve open time (Reference time + 0.1~3 sec)	

의 제어 방법을 도출하고자 하였다. 전류 별 정 전류 운전을 통해 드레인 밸브 전/후단 차압에 따른 드레인 1회 평균 배출량을 측정하였다. 이때, 드레인 밸브에서 가습기로의 응축수 배출 라인을 외기로 분리하여 응축수를 포집하였다. 또한 드레인 밸브의 닫힘 시점을 수위센서 off 이후로 지연시켜 연료극 응축수 배출량을 측정함으로써 드레인 밸브의 닫힘 시점을 결정하고자 하였다. 정상조건에서의 응축수 배출량 측정 시험 조건을 Table 1에 나타내었다.

드레인 밸브의 닫힘 시점을 지연시켰을 때, 수소가 응축수와 함께 배출 된다면 PMC의 수소 이용률이 저감될 것 이며, 이는 곧 연비 및 시스템 효율과 직결되는 문제이다. 따라서 드레인 밸브의 닫힘 시점을 수위센서 off 이후로 지연시켰을 경우에 드레인 밸브를 통해 수소가 배출되는지 확인하기 위하여 US06 모드로 운전하며 드레인 밸브 주변부의 수소 농도를 측정하였다.

### 2.2 비정상 조건에서의 연료극 응축수 생성량 예측 모델

현 LM FCEV PMC에서 비정상 조건 즉, 수위센서의 고장 등과 같은 상황을 대비한 비상 제어 로직은 연료전지 스택의 전류적산 값을 기준으로 일정수준에 도달할 때 까지 응축수 배출을 하지 않을 경우 수위센서의 고장 및 오작동으로 판단, 비상로직이 적용되어 강제로 드레인 밸브를 일정 주기마다 개방시켜 응축수를 배출하도록 하고 있다. 그러나 서론에서 언급한 바와 같이 현 기준 수치 값에 도달할 때까지 응축수 배출이 이뤄지지 않을 경우 연료극 flooding 현상이 발생하게 되어 스택의 전압 저하 등에 의해 연료전지 시스템의 성능저하를 야기시킬 수 있다. 따라

서 연료극 물 관리에 대한 fail-safety 전략으로서 수위센서가 작동하지 않는 비정상 조건에서 연료극 응축수 생성량 예측 모델을 통해 적절한 응축수 배출 시기를 결정하고자 하였다. 이때 연료극내의 응축수는 스택에 인가되는 전류와 운전온도의 영향을 받는다. 이는 스택에 인가되는 전류량에 따라 반응의 부산물인 물의 양이 결정되기 때문이며, 연료전지 시스템의 운전온도에 따라 연료극 내의 수분이 응축되는 정도가 다르기 때문이다. 따라서 PMC의 정상 운전 온도를 기준으로 저온 및 고온을 설정하여 각각의 실험을 진행하였다.

각 실험에 앞서 PMC의 초기 운전조건을 동일하게 만들기 위해 pre-condition test를 수행했다. 일정 전류를 10분간 운전하면서 연료전지 시스템의 운전온도를 승온시켰고 이후 드레인 밸브를 강제로 작동시켜 워터트랩 내의 응축수를 모두 제거했다. 이후 다양한 실차 운전 모드 별 응축수 배출시점을 확인하기 위하여 UDDS, NEDC, US06, HWFET, AB mode 및 자체 개발 운전모드인 실주행내구모드(HMC mode) 운전을 실시하였다. Table 2에 각 운전 모드를 운전 조건별로 비교하였다. UDDS와 NEDC 모드의 경우 평균 전류를 US06 수준으로 상향시켜 운전함으로써 동일

평균 전류 모드에서의 응축수 배출 시점 특성을 확인하였다. 각각의 모드 운전에 앞서 워터트랩 내의 응축수를 모두 제거하였기 때문에 워터트랩 내부 용적에 의해 최초 응축수 배출이 일어날 때까지 워터트랩에 쌓인 응축수의 양 및 응축수 누적속도를 계산할 수 있으며, 연료극 내부로 응축수가 유입되지 않는 최대 허용 응축수량은 워터트랩의 전체 용적이 된다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 정상 조건에서의 연료극 응축수 배출 로직 개발

드레인 밸브의 유량계수가 1.0과 0.8인 드레인 밸브를 적용하고 각각 전류별 정전류 운전을 통해 응축수 배출 로직의 첫 번째 변수인 드레인 밸브 전/후 단 차압에 따른 드레인 1회 평균 응축수 배출 비율을 유량계수 1.0인 밸브를 기준으로 Fig. 3에 나타내었다. 이때 유량계수가 0.8인 드레인 밸브의 단힘 시점을 수위센서 off 후 0.2, 3초로 지연시켜 시험을 진행하였다. 그 결과 유량 계수 0.8인 드레인 밸브의 기본 개방 시간을 증대 시, 유량계수 1.0인 경우와 1회 배출량이 동등 수준임을 확인 할 수 있었다. 이를 통해 유량계수가 0.8로 감소할 경우 드레인 밸브의 단힘 시점이 0.2~3초 정도 증가해야만 유량계수 1.0 수준의 응축수 배출 성능을 확보 할 수 있음을 알 수 있다.

Table 2 Comparison of driving mode

Driving mode	Average Current [A]
UDDS (Urban dynamometer driving schedule)	17.4
NEDC (New European Driving Cycle)	19.3
US06 (High speed/high load cycle)	62.5
HWFET (Highway fuel economy test)	42.8
AB (Fuel economy test of AB)	67.9
HMC Mode (Real road driving cycle)	30.0
UDDS current offset	62.5
NEDC current offset	62.5

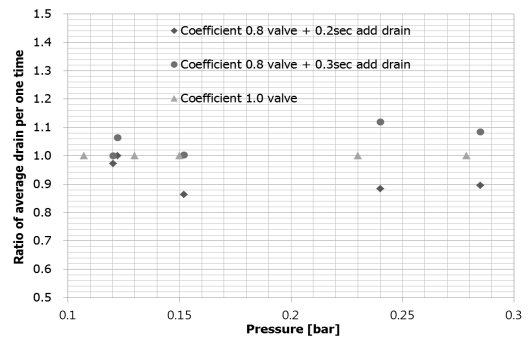


Fig. 3 A ratio of condensate water by pressure drop of drain valve

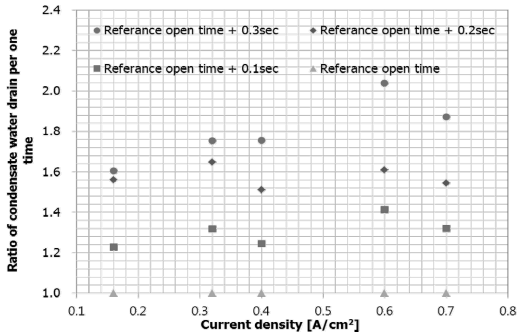


Fig. 4 A ratio of condensate water at drain valve closed: current based

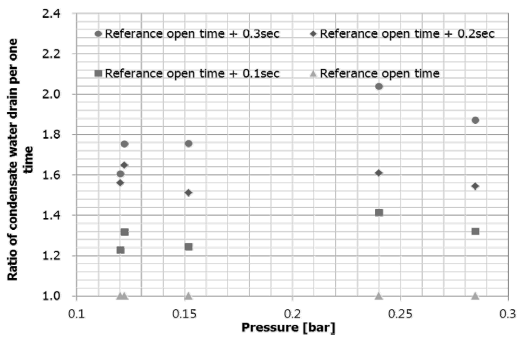


Fig. 5 A ratio of condensate water at drain valve closed: pressure based

응축수 배출 로직의 두 번째 변수인 드레인 밸브의 닫힘 시점에 따른 응축수 배출량을 측정하기 위해 유량계수 0.8의 드레인 밸브를 적용하여 밸브의 닫힘 시점을 수위센서 off 이후 0.1~3초로 설정하여 드레인 밸브를 통해 배출되는 응축수를 측정하여 Fig. 4에 나타내었다. 저 전류 영역인 0.16, 0.32A/cm<sup>2</sup>에서는 밸브 닫힘 시점을 0.3초 지연 적용 시, 0.2초 지연의 경우와 1회 배출량의 차이가 거의 없던 반면, 중 전류인 0.4, 0.6, 0.7A/cm<sup>2</sup>에서는 0.2초와 0.3초 간 1회 배출량 차이가 다시 벌어졌다. 이는 중전류 이상의 영역에서 밸브 전단 압력인 연료극 출구측 압력이 증가하였기 때문이다. Fig. 5는 드레인 1회에 대한 응축수 평균 배출량을 드레인 밸브의 전단 압력에 대하여 나타낸 것이다. 이를 통해 연료극 시스템 압력 기준으로 드레인 밸브 닫힘 시점이 구분되어야

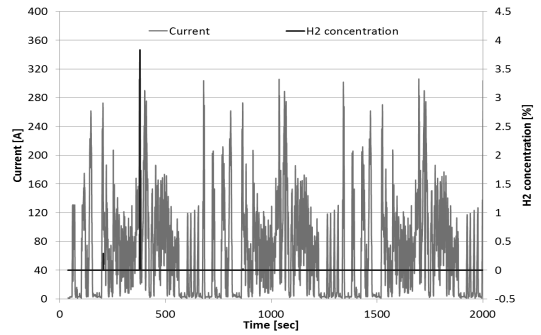


Fig. 6 A peak concentration of hydrogen in the drain valve: 3 cycle of US06 mode

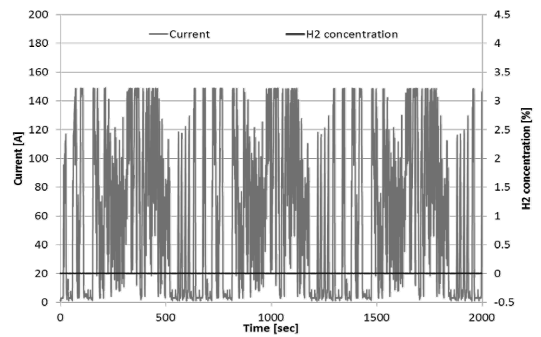


Fig. 7 A peak concentration of hydrogen in the drain valve: 5 cycle of US06 mode under 150A

함을 확인할 수 있었다.

드레인 밸브의 닫힘 시점을 과도하게 지연 시켰을 경우 드레인 밸브를 통해 수소가 배출될 수 있으므로 이를 확인하기 위하여 연료전지 시스템을 US06 모드로 운전하며 드레인 밸브 주변부의 수소 농도를 측정하였다. Fig. 6에 밸브 닫힘 시점 지연시간을 0.2초, 0.3초로 적용 시 US06 모드 운전을 하면서 드레인 밸브 주변에서 수소 농도를 측정한 결과를 나타내었다. 밸브 닫힘 시점 지연시간을 0.2초 적용 시에는 수소는 감지되지 않았으나, 0.3초 적용 시에는 고전류 구간에서 간헐적으로 감지되었다. 더불어 연료극 압력이 낮은 영역인 0.4A/cm<sup>2</sup> 이하 영역에서 운전할 경우에는 드레인 밸브 닫힘 시점을 0.3초 지연한다 하더라도 수소 리크가 없음을 재확인하였고 이를 Fig. 7에 나타내었다.

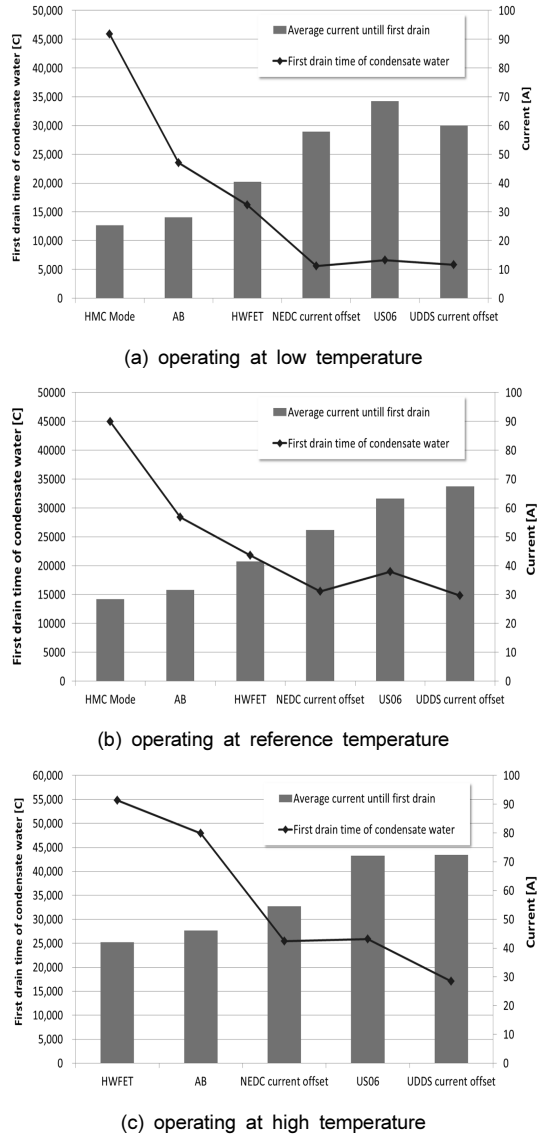
**Table 3** A logic of opening the drain valve

	Drain coefficient 1.0	Drain coefficient 0.8	Remark
Drain valve close timing	Level sensor off	$\Delta P \geq 0.1$ bar, level sensor off + 0.2sec	$\Delta P$ : Pressure difference of drain valve with humidifier
		$\Delta P < 0.1$ bar, level sensor off + 0.3sec	

이에 연료극 압력이 낮은 영역과 높은 영역에서의 드레인 밸브 닫힘 시점을 구분해야 하며 본 시험에서는 운전 빈도가 큰 저전류(저출력)구간에서는 응축수 배출 성능을 확보하기 위해 밸브 기본 개방 시간을 수위 센서 OFF 후 0.3초로, 그 이상의 고출력 구간에서는 0.2초로 적용하도록 하였다. 이상의 결과로부터 유량 계수가 1.0에서 0.8로 하향 조정된 밸브가 적용된 시스템 운전 시 응축수 배출 로직을 도출하여 Table 3에 나타내었다. 즉, 드레인 밸브의 유량 계수가 1.0에서 0.8로 감소하였을 경우 연료극과 공기극 출구 간 차압을 0.1 bar 기준으로 기본 밸브 개방 시간을 0.2 또는 0.3초 증대 적용 시, 유량 계수 1.0 밸브를 적용한 시스템과 동등한 물 배출 성능이 구현됨을 확인하였다.

**3.2 비정상 조건에서의 연료극 응축수 배출 로직 개발**

워터트랩 내 응축수를 모두 제거한 상태에서 시스템 운전온도 별 다양한 차량 주행 모사 모드운전을 실시하여 최초 드레인이 발생하는 시점까지 누적 전류 값과 최초 드레인이 발생할 때까지의 평균전류를 Fig. 8에 운전온도 별로 나타내었다. 그래프에서 알 수 있듯이 최초 응축수 배출이 일어나는 시점까지의 평균전류와 최초 응축수 배출 도달 시점이 반비례하는 경향을 확인할 수 있었다. 이때, UDSS 및 NEDC 모드의 경우 평균전류가 낮기 때문에 모드운전 중에 응축수 배출이 이뤄지지 않았다. 워터트랩의 내부에 응축수가 없는 상태에서 최초 드레인이 발생할 때까지의 누적 응축수량을 계산하여 이를 통해 각각의



**Fig. 8** First drain time of condensate water by operating mode at removing residual condensate water in the water-trap

실험에 대해서 응축수 생성속도를 도출하여 이를 Fig. 9에 나타내었다. Fig. 9에서 도출한 응축수 생성 속도 수식을 이용하여 수위센서의 고장 및 오작동 시 연료극 응축수 배출 시점을 결정하도록 하였다. 이와 같은 응축수 생성량 예측 모델을 기반으로 비정상 조건에서의 연료극 응축수 배출 로직을 개발하였으며 이를 Fig. 10에 나타내었다. 연료전지 차량의

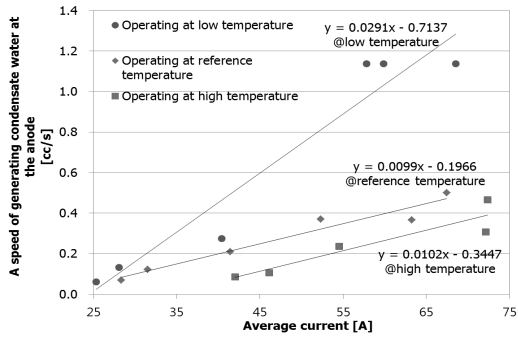


Fig. 9 A speed of generating condensate water at the anode water-trap by operating temperature

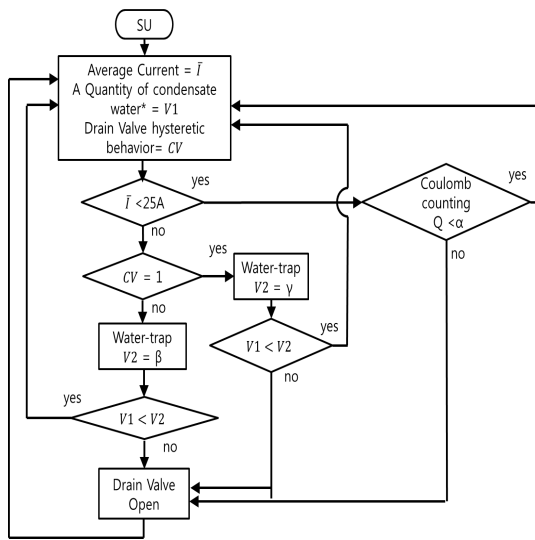


Fig. 10 Flowcart of emergency logic for condensate water drain at anode

시동 직후 스택에 인가되는 평균전류와 드레인 밸브의 개방이력을 모니터링하는 한편, 상기 Fig. 9에서와 같이 도출한 평균전류에 따른 응축수 생성량 예측 모델을 이용하여 워터트랩내의 누적 응축수량을 실시간으로 계산한다. 이때, 드레인 밸브의 개방 이력에 따라 비상 로직을 이원화 시켜 워터트랩의 내부 용적에 대한 응축수가 스택으로 내부로 유입되지 않는 최대 허용 응축수량이 결정되고, 누적되는 응축수량이 최대 허용 응축수량보다 많아질 경우 드레인 밸브를 강제로 작동시켜 워터트랩내의 응축수를 배출시키는 로직이다.

## 4. 결 론

LM FCEV PMC를 이용하여 드레인 밸브 특성인 유량계수가 1.0에서 0.8로 하향 조정된 밸브가 적용된 시스템에서 드레인 밸브의 기본 개방 조건과 응축수 배출량 및 응축수 배출 시 수소 누출 여부를 평가하였다. 연료극과 공기극 출구의 차압을 0.1 bar 기준으로 기본 밸브 개방시간을 0.2~3초 증대시켜 응축수 배출 성능을 확보하여 연료전지 시스템의 FPS 내 물 관리를 위한 운전 로직을 도출하였으며, 수위 센서의 오작동 및 고장 시 적절한 응축수 배출 시점을 결정하는 시험을 통하여 연료전지 시스템의 연비 및 운전안정성을 확보하고자 하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 연료극의 워터트랩에 축적되는 응축수는 적절한 시점에 배출을 하지 않을 경우 연료극 내에 flooding 현상이 발생하여 성능저하 및 출력저하를 일으키는 요인이 된다.
- 2) 연료극 응축수 배출은 드레인 밸브 전/후단 압력인 연료극 출구와 공기극 가습기 출구 측 압력의 차이에 영향을 받으며 그 차압특성에 따라 응축수 밸브 개폐 시점이 구분되어야 한다.
- 3) 드레인 밸브의 유량계수 하향 적용 시 이전 사양과 동등한 응축수 배출 성능을 확보하기 위해 기본 밸브 개방 시간, 응축수 배출량 및 응축수 배출 시 수소 누출 여부를 평가하여 연료극 내 응축수 배출 로직을 최적화 할 수 있다.
- 4) 워터트랩에 축적되는 응축수는 스택에 인가되는 평균전류에 비례하여 생성되며, 연료전지 시스템의 운전온도에 따라 평균전류에 대한 응축수 생성속도 수식을 통해 연료극 응축수 생성량 예측 모델을 만들 수 있다.
- 5) 비상 로직을 통하여 연료극의 응축수의 적절한 배출 시점을 결정함으로써, 연료극 내 flooding 현상을 사전에 방지하여 출력저하 및 성능저하를

막을 수 있으며, 드레인 밸브를 통한 수소배출을 막아 연비하락 및 연료전지 시스템의 FPS내 물 관리에 대한 전략을 개발할 수 있다.

## 후 기

본 연구는 2015~2016년 산업통상자원부 재원인 ‘시스템 소형화를 위한 가변압력 PEMFC 핵심부품 개발’로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 과제입니다(No. 20143010031840).

## References

1. C. Bao, M. Ouyang, and B. Yi, “Modeling and control of air stream and hydrogen flow with recirculation in a PEM fuel cell system—I. Control-oriented modeling”, *J. Hydrogen Energy*, Vol. 31, No. 13, 2006, p. 1879.
2. A. Taniguchi, T. Akita, K. Yasuda, and Y. Miyazaki, “Analysis of Electrocatalyst Degradation in PEMFC Caused By Cell Reversal During Fuel Starvation”, *J. Power Sources*, Vol. 130, No. 1-2, 2004, p. 42.
3. D. Liang, Q. Shen, M. Hou, Z. Shao, and B. Yi, “Study of the Cell Reversal Process of Large Area Proton Exchange Membrane Fuel Cells Under Fuel Starvation”, *J. Power Sources*, Vol. 194, No. 2, 2009, p. 847.
4. H. Lee, H. Song, and J. Kim, “PEMFC Performance on Reverse Voltage by Fuel Starvation”, *Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society*, Vol. 17, No. 2, 2006, p. 133.
5. H. Li, Y. Tang, Z. Wang, Z. Shi, S. Wu, D. Song, J. Zhang, K. Faith, J. Zhang, H. Wang, Z. Liu, R. Abouatallah, and A. Mazza, “A Review of Water Flooding Issues in the Proton Exchange Membrane Fuel Cell”, *J. Power Sources*, Vol. 178, No. 1, 2008, p. 103.
6. J. O’Rourke, M. Ramani, and M. Arcak, “In situ detection of anode flooding of a PEM fuel cell”, *J. Hydrogen Energy*, Vol. 34, No. 16, 2009, p. 6765.