

# 수소 활용공정 안전성 확보를 위한 미반응 수소 산화-열 회수 시스템의 운전 조건 최적화 연구

장영희 · 김성수\*,†

경기대학교 일반대학원 환경에너지공학과, \*경기대학교 환경에너지공학과  
(2023년 4월 10일 접수, 2023년 4월 30일 수정, 2023년 5월 2일 채택)

## A Study on the Optimal Operating Conditions for an Unreacted Hydrogen Oxidation-Heat Recovery System for the Safety of the Hydrogen Utilization Process

Younghee Jang and Sung Su Kim\*,†

Department of Environmental Energy Engineering, Graduate School of Kyonggi University, Suwon-si 16227, Korea

\*Department of Environmental Energy Engineering, Kyonggi University, Suwon-si 16227, Korea

(Received April 10, 2023; Revised April 30, 2023; Accepted May 2, 2023)

### 초 록

본 연구는 수소 경제 사회의 안전 확보를 위해 수소 연료전지 후단 배출된 미반응 수소를 안정적으로 산화하는 방안  
에 대해 논의하였다. 안전 시스템은 미반응 수소를 에너지원 없이 제거할 수 있는 상온 산화촉매를 충전하였으며,  
이때 반응으로 배출되는 산화열은 안정적으로 회수할 수 있는 열 회수 장치를 연계하고자 하였다. 그 결과, 수소 산화  
시스템의 충전 조건에 따라 시스템 내 압력 및 유체 흐름이 변화함을 CFD 분석을 통해 확인하였다. 또한 배가스 온도,  
열 회수기 내 유량 및 압력조건을 최적화하여 300 °C 이상의 배가스 산화 열원을 40 °C 이상의 온수를 확보하는 방식  
으로 폐열을 회수할 수 있음을 확인하였다. 본 연구를 통해 수소 연료전지와 같은 중·소규모 사업장에 적용된 수소  
활용 공정을 실증 규모로 평가하여 안전 시스템으로의 가능성을 확인하였다. 추후 실증화 연구를 통해 예측하지 못한  
수소 안전사고에 대해 대응할 수 있는 안전 가이드로 활용될 수 있다고 판단된다.

### Abstract

In this study, a catalytic oxidation-heat recovery system was designed that can remove unreacted with a concentration of about 1% to 6% in the exhaust gas of hydrogen fuel cells and recover heat to ensure safety in the hydrogen economy. The safety system was devised by filling hydrogen oxidation catalysts at room temperature that can remove unreacted hydrogen without any energy source, and an exhaust-heat recovery device was integrated to efficiently recover the heat released from the oxidation reaction. Through CFD analysis, variations in pressure and fluid within the system were shown depending on the filling conditions of the hydrogen oxidation system. In addition, it was found that waste heat could be recovered by optimizing the temperature of the exhaust gas, flow rate, and pressure conditions within the heat recovery system and securing hot water above 40 °C by utilizing the exhaust gas oxidation heat source above 300 °C. Through this study, it was possible to confirm the potential of utilizing hydrogen processes, which are applied in small to medium-sized systems such as hydrogen fuel cells, as a safety system by evaluating them at a pilot scale. Additionally, it could be a safety guideline for responding to un-expected hydrogen safety accidents through further pilot-scale studies.

**Keywords:** Hydrogen, Hydrail, Safety, Hydrogen fuel cell, Heat recovery

## 1. 서 론

화석 연료의 고갈과 대기 중 온실가스의 증가는 급격한 기후변화를 야기하고 있으며, 화석연료를 대체할 수 있는 신·재생 에너지에 대한

중요성이 점차 커지고 있다[1-5]. 최근 화석연료를 대체할 수 있는 미래 에너지원인 수소 연료 개발이 활발해짐에 따라 수소 발전 외에도 연료전지와 연계되어 차량, 열차, 선박 및 건설기계 등 다양한 규모의 운송수단에 수소를 활용한 제품들이 개발되고 있다[5-6]. 수소 연료전지는 수소와 산소의 전기화학반응을 통해 전기가 발생하며, 부산물로 순수한 물만 배출되는 청정기술[6]로, 전기에너지를 이용하는 철도차량은 수소 연료전지를 빠르게 적용할 수 있는 대표적인 상용화 시스템으로 연구되어 왔다[7-12]. 수소-철도차량 연구는 2002년 캐나다에서 시연된 수소동력 기관차를 시작으로 미국교통부 초청 강연에서 수

† Corresponding Author: Kyonggi University  
Department of Environmental Energy Engineering, Suwon-si 16227, Korea  
Tel: +82-31-249-9741 e-mail: sskim@kyonggi.ac.kr

소열차(hydrail)라는 용어가 언급되면서 본격적인 연구가 수행되었고 [13], 일본은 2006년에 세계 최초로 100 kW급 철도차량용 연료전지 개발에 성공하였고 중국 또한 2017년 10월부터 수소 연료전지 하이브리드 트램(tram)의 상업운행을 개시한 바 있다. 이와 같이 한국을 포함해 미국, 캐나다, 독일, 일본, 중국 등 전 세계적으로 수소 열차에 대한 상용화 연구가 수행되고 있다. 최근에는 수소 열차가 디젤열차와 비교하여 성능과 탑승 가능 승객수가 큰 차이가 없는 수준으로까지 발전했고 이미 전 세계적으로 수소 열차 개발 및 상업운행이 이루어지고 있다[13-14].

그럼에도 불구하고 다방면으로 확대된 수소 활용 산업에 비해 성능, 안전, 법령, 정책, 인프라 등 많은 부분에서 검토가 필요하며[13], 특히 수소 활용에 대한 안전성 확보 연구는 다소 미흡한 실정이다. 이는 수소의 특징 때문인데, 수소는 공기보다 매우 가벼워 대부분 수소 누출 센서 및 환기를 통해 제거가 가능하므로 안전 인프라가 충분하다는 의견이 주장되고 있다[15]. 이러한 수소 특징에 의해, 수소 연료전지 안전 인프라는 기계적 환기 효율을 증진시키는 방안 중심으로 많은 연구가 보고되고 있다[15-18]. 이들은 모두 누출된 수소에 대한 농축을 예방하기 위한 연구이나, 지하 철도와 같은 폐쇄 공간에서의 예측하지 못한 사고 등 전기가 유통되지 않는 비상사태에 안전사고는 고려되지 않았다. 수소는 매우 큰 에너지를 갖기 때문에 빈번하게 발생하는 작은 사고보다는 드물지만 큰 사고가 발생할 수 있으므로, 미반응 또는 누출된 수소에 대하여 에너지원이 필요하지 않은 안전망 구축 시스템 연계가 필요하다. 이는 원자력 시스템과 같은 고농도 수소 조건부터 시작하여 다양한 연구자들에 의해 미반응 수소 제거를 위해 별도의 열원이 필요하지 않은 수소 상온 산화 촉매가 제안된 바 있으며, 최근에는 연료전지 누출 농도 범위인 0.5~4% 미만 저농도 수소에 대한 상온 산화 촉매 제조 레시피가 보고되었다[19-22]. 그러나 이들은 모두 수소를 산화하는 활성 자체만 보고되었으며, 실 공정에 연계될 수 있는 시스템 연구는 미흡한 실정이다. 또한 선행 연구를 통해 파우더 형태의 촉매를 실 공정에 적용할 수 있는 허니컴 형태로 모듈화하여 보고하였으나[23], 수소를 산화하면서 발생한 고온의 열을 처리할 수 있는 실용화 연구는 보고되지 않았다. 이에 본 연구에서는 Figure 1과 같이 수소 연료전지에 발생한 미반응 수소와 반응열을 제거할 수 있는 허니컴형 수소 상온 산화 촉매와 열 회수 시스템을 제안하고자 하며, 연계된 시스템의 효율적인 운전을 위해 촉매 발열 온도, 압력, 유량에 따른 열 회수 효율 증진 최적 조건을 도출하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1. CFD 모델 해석

본 연구에서 수행된 촉매 산화-열 회수 반응기 중 고온의 열이 배출되는 촉매 산화 층의 최적 충전 방법을 검토하고자 CFD 분석을 수행하였다. CFD 모델은 정상상태, 작동유체는 동일한 밀도를 갖는 공기로 가정하였다. 또한 난류모델은 가장 범용적인 K-E 모델 중 realizable k-e 모델을 이용하였다. 벽(wall)의 전단력 해석은 벽함수 모델인 tw-layer all y+ 모델을 이용하여 해석을 수행하였다. 촉매 설비의 경우 촉매 층 압력강하 계산을 위해 전체 계산영역(computational domain)에서 촉매가 위치한 부분을 설정하였고, 그 부분을 유체속도, 점성계수, 밀도 등과 같은 유체유동특성에 의한 압력강하계산을 위해 포르하이머(Forchheimer)식을 적용하였다.

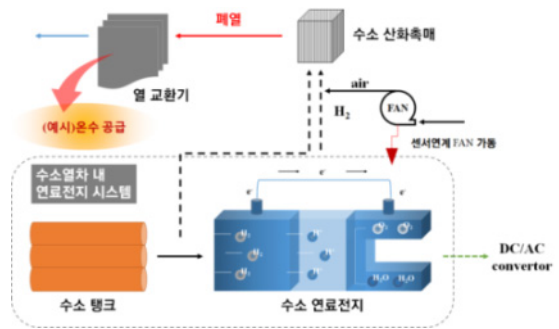


Figure 1. Fuel cell system with heat recovery and hydrogen oxidation catalyst.

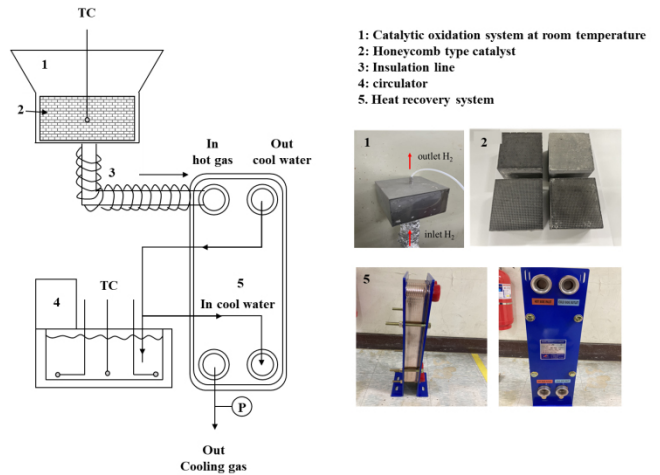


Figure 2. Schematic of catalyst-heat recovery system.

### 2.2. 수소 상온 촉매 연계 열 회수기 구축

본 연구에서는 선정된 관형 열 회수기[24]를 이용하여 다양한 유체 유량의 열 회수 성능을 평가하고자 하였다. 발열체는 수소 상온산화용 허니컴형 촉매를 적용하였고, 1% 또는 4% H<sub>2</sub>, 21% O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> balance의 유체를 30 L/min 유량으로 반응시켰다. 수소 산화열이 포함된 배가스는 열 회수기에 곧바로 주입되었다. 열매체는 물을 사용하였으며, 다양한 순환 유량에 따른 온도 상승률을 평가하였다. 구축된 촉매-열 회수 시스템을 Figure 2와 같이 나타내었다.

### 2.3. 열 회수 실험 방법

구축된 열 회수기 장치 내 유체 온도를 측정하기 위해 열전식 온도 기록계(Graphtec, GL240)와 비금속 열전대(T type)를 이용하였다. 교정 후 6개월이 지나지 않은 장치를 사용하였으며, 그 중 교정된 3개의 열전대를 수조 내 골고루 분포되도록 배치하였다. 열 회수 실험이 수행되고 열전대 센서를 통해 최대 180분간, 1회/1분의 속도로 수조 온도를 열전식 온도기록계에 기록하였다.

열 회수 시스템은 공기의 유입 및 유출 온도 차이와 해당 온도의 밀도, 유량에 따라 회수 가능한 폐열의 양에 차이가 있다. 따라서 본 연구에서 구축한 열 회수 시스템은 유체를 일정 속도에 따라 순환하였으며, 주입된 유량의 inlet, outlet을 측정하여 다음 식으로 계산하였다.

$$Q = m \times Cp \times (t_2 - t_1) \quad (1)$$

$$\text{폐열 회수율(\%)} = \frac{\text{열 회수 시스템 적용 후 활용된 폐열량}}{\text{열 회수 시스템을 적용한 운전 시간 동안 발생한 폐열량}} \times 100 \quad (2)$$

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 수소 제거 촉매-열 회수 시스템 설계 분석

촉매 산화 시스템과 열 회수 시스템의 연계공정에서 주요하게 고려되어야 하는 사항은 크게 성능과 안정성 두 가지로 구분할 수 있다. 우선 수소 연료전지에서 미반응된 수소를 90% 이상 제거해야 하며, 산화된 후 고온의 유체는 외부로 유출되지 않고 열 회수기로 이동해야 한다. 또한 반응기 내부 수소 농축에 의한 반응기의 화재를 방지할 수 있도록 안정성이 고려된 시스템 설계가 필요하다. 이에 시스템의 성능 및 안정성을 확보하기 위하여 수소 산화 촉매 시스템의 주 소재인 허니컴형 촉매의 충전 형태에 따른 반응기 내부의 촉매 층 충전 정도를 시뮬레이션하여 최적화된 scale-up된 촉매-열 회수기 반응기를 도출하고자 하였다(Figure 3, Table 1).

CFD분석은 기존 설계되어 있던 일반적인 수소 산화 장치를 기준으로 수행하였으며, 초기 분석은 반응기의 형상 분석으로 장치의 운전 조건과 최대한 유사한 조건을 가정하였다. 더불어 설계인자의 도출을 위해서는 다양한 case를 평가해야 하기에 반응기 내부를 정상상태로 가정하였다. 그 결과, 동일 촉매 부피를 서로 다른 형태로 충전할 경우 압력구배가 일부 완화되었으며, 적당한 촉매의 두께가 정류자 역할을 하여 유동이 안정적인 것을 확인하였다. 또한 덕트에 충전되는 촉매의 부피가 클수록 압력구배와 속도구배가 커졌으며, 속도구배의 경우 일정 부피 이상에서 급격히 증가하는 경향을 보였다. 이는 충전된 촉매의 양이 많아질수록 유체 흐름에 부정적인 영향을 주는 것으로 판단되었는데, 대부분 촉매의 담지량이 많아질수록 시스템의 성능은 향상되는 결과가 관찰되므로[23,25] 시스템 활성화와 유체 흐름을 복합적으로 검토하여 허니컴 타입 내 기공 크기, 촉매 담지량을 적절히 조절해야 함을 확인하였다. 즉, 촉매의 부피에 따라 공간속도가 달라지며, 성능에 직접적인 영향을 미치므로, 실제 공정의 운영을 통해 성능과 유동 간 적절한 타협점의 도출이 요구된다고 판단하였다.

#### 3.2. 열 회수기 최적 운전 조건 도출

##### 3.2.1. 열 회수기 용량별 열 회수율 평가

본 연구는 다양한 산업 공정 내 배출되고 있는 폐열을 활용하기 위해, 그 중 수소 산화 반응열의 폐열 회수 운전 조건을 최적화하고자 하였다. 이에 따라 구축된 환형 열 회수기의 열매체를 상온(25 ± 5 °C)으로 설정한 후, 순환하는 유량(0.1, 0.5, 3, 5 L/min)의 상승 온도를 관찰하였다(Figure 4). 그 결과, 1 atm 조건(상대압력 기준)에서 많은 양의 물이 순환될 경우 공기의 열량이 물을 가열하기 충분치 못하였으며, 열매체 순환 유량이 커질수록 수온 상승폭은 급격히 감소함을 확인하였다. 특히 0.1 L/min 순환 시 초기 18 °C 수온이 약 37 °C로 도달하는데 걸린 시간은 100 min임에 반해, 0.3 L/min의 경우 180 min이 소요되었다. 그 외 3 L/min과 5 L/min 순환 시 유의미한 수온 상승 결과가 관찰되지 않았음을 확인하였다. 이를 열 회수율로 계산한 결과 0.1 L/min, 0.5 L/min, 3 L/min, 5 L/min 각각 52.17%, 25.23%, 8.08%, 4%를 기록하였다. 다만 본 연구는 산업적으로 이용되고 있는 연료전지 후단 배가스의 폐열 회수 및 활용 방안을 고찰하는 것으로써, 0.1 L/min라는 작은 규모의 온수는 활용하기 어려울 것으로 판단하였다. 열 회수기는 각 격자 간 열전달을 위해 시스템 가압이 반드시

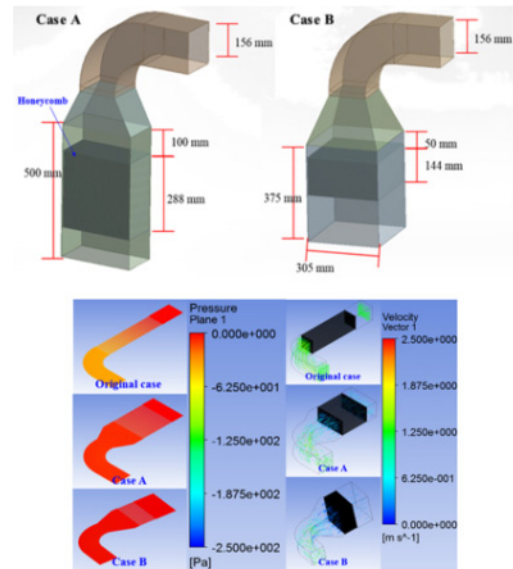


Figure 3. Fluid distribution (pressure and velocity vector) with honeycomb catalyst filling type.

Table 1. Fluid Distribution (Pressure and Velocity Vector) with Honeycomb Catalyst Filling Type

Vector	Original	Case A	Case B
∠ P	39.526	10.523	4.254
∠ V	2.158	1.681	1.691

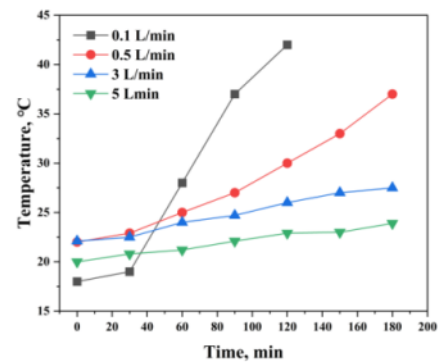


Figure 4. Fluid temperature change with circulation velocity

필요하다[26]. 즉, 동일한 배가스 유량의 열에너지를 열매체에 보관하기 위해 적절한 열매체 용량과 열 회수기 시스템 내 압력을 상승시켜 열 회수 효율을 높일 수 있을 것으로 판단하였다. 또한 본 연구의 폐열은 소성로, 전기로와 같은 높은 열원 후단이 아닌 중온(250~400 °C)이며, 이러한 배출열을 효율적으로 회수하기 위해서는 가열 유체의 최소화 작업 및 순환 시스템 속도를 늦추는 것이 최적의 방법이라고 판단하였다.

##### 3.2.2. 열 회수기 내 유입 온도 및 가압 조건별 열 회수율을 평가

본 연구는 수소연료전지 후단 발생된 폐열을 회수할 수 있는 최적 운전조건을 선정하고자 하며, 특히 철도 차량과 같은 지하공간에서 활용되는 소규모의 장치와 연계될 수 있는 열회수 방안에 대해 검토

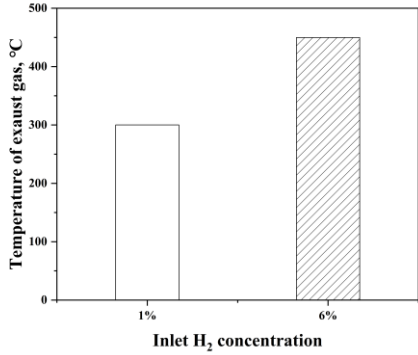


Figure 5. Effect of temperature on inflow hydrogen concentration in the catalytic oxidation system.

하였다. 유입 가스는 수소 연료전지 후단에서 배출되는 수소 농도 범위인 저농도(1% H<sub>2</sub>)와 고농도(6% H<sub>2</sub>) 조건으로 나누어 허니컴형 상온 산화 촉매를 거치도록 하였고, 수소 산화 반응열이 발생된 배출 가스의 온도를 확인하였다(Figure 5). 유입된 수소는 99% 이상 산화되었으며, 산화된 수소의 농도가 다름에 따라 배출된 반응 열량 또한 상이할 것으로 판단하였다. 그 결과, 저농도 수소가 산화될 경우 약 300 °C의 배가스 온도가 관찰되었으며, 고농도 수소가 산화될 경우 약 450 °C 이상의 산화 온도가 관찰되었다. 이에 수소 시스템 반응 조건에 따라 배출 가스 온도가 변화할 수 있으며, 위 배가스 흐름에 따른 열회수 영향을 확인하고자 하였다(Figure 6). 유입 가스는 앞서 보고된 수소 연료전지 후단 배출 수소 농도를 저농도(1% H<sub>2</sub>)와 고농도(6% H<sub>2</sub>)에서의 배가스 온도(300 °C, 450 °C)에 차이를 두어 실험을 수행하였으며, 연계된 열 회수 시스템은 1~4 atm의 가압 조건에 따른 기-액 열전달 효율 성능을 평가하였다. 그 결과, 모든 촉매 조건에서 압력이 증가할수록 상승하는 수온 차이가 커짐을 확인하였으며, 주입된 배가스 온도가 높을 때 상승 폭이 급격히 증가하였다. 그러나 배가스 온도에 따른 열 회수기 영향은 다소 차이가 관찰되었다. 배가스 온도가 300 °C (1% H<sub>2</sub> 산화 시)인 경우 각 압력별 온도 증가 폭은 1 atm부터 각각 1.1 °C, 5.4 °C, 7.8 °C, 15 °C로 증가하였음에 반해, 배가스 온도가 450 °C (6% H<sub>2</sub> 산화 시) 이상인 경우 3 atm 가압 조건 이후로 가열된 온도 폭이 미미하다는 것이다. 즉, 열 회수기 자체의 전달될 수 있는 열전달계수가 고정되어 있음에 따라, 배가스의 열량이 클수록 가압의 영향은 다소 감소할 수 있음을 확인하였다.

3.3. 수소 산화열 및 폐열 회수 간 에너지 효율 평가

본 연구는 수소연료전지 후단 미반응된 수소를 산화하는 촉매 시스템에

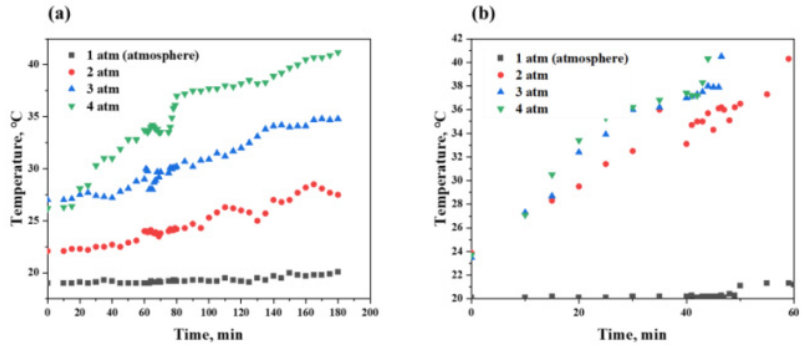
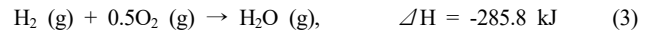


Figure 6. Effect of pressure on fluid temperature in the catalyst exhaust-heat recovery system. Catalyst exhaust gas temperature (a) 300 °C and (b) 450 °C.

템에 발생된 열을 회수하여 온수 또는 온풍으로 활용할 수 있는 폐열 회수 시스템을 연계하였다. 이 때 실제 발생된 산화에너지와 폐열 회수 중 소모되는 에너지를 비교하여 실제 폐열 회수의 효율을 평가하였다(Table 2).

수소 산화 식은 식(3)과 같으며, 1 mol의 H<sub>2</sub>는 2 g의 H<sub>2</sub>로 계산할 수 있으므로 1 kg의 H<sub>2</sub>를 산화하는 데 142,900 kJ의 열량이 발생됨을 확인하였다. 또한 물 순환의 에너지는 순환하는 시간에 따라 차이가 있으므로, 10 LPM급 시스템 내 저농도(1%) 수소 배출 또는 고농도(6%) 수소 배출의 경우로 나누어 비교하였다.



물을 가열하지 않는 순환식 펌프(circulator)의 전력을 최대(극한조건)로 가동함으로 설정했음에도 불구하고, 수소 산화 에너지 대비 매우 낮게(40 W) 산출되었다. 즉, 물 회수를 위한 순환에 소모되는 에너지는 무시할 수 있다고 가정하였다. 즉, 산화열 대비 펌프의 에너지비가 10배 이상 대비되므로, 본 수소 산화-폐열 회수 시스템은 효과적으로 운전될 수 있다고 판단하였다.

Table 2은 열 회수 효율을 100%로 고려한 결과로써 이론상 회수가 가능한 에너지를 산출하였다. 반면 산업 현장에 이용될 경우 시스템의 효율을 100% 발휘할 수 없음에 따라, 열 회수 시스템의 에너지 손실을 고려하여 저농도(1%) 수소 배출 환경에서 수소 산화 에너지 및 열 회수 에너지를 비교하여 Table 3에 나타내었다. 그 결과, 열 회수 효율을 100% (이론) 대비 60%, 40%로 가정했을 때 122,980 kJ (60%), 113,020 kJ (40%)회수가 가능함을 확인하였다.

Table 2. Comparison of Heat Recovery Energy Efficiency for Varying Hydrogen Concentrations

Value	Low hydrogen concentration (1% H <sub>2</sub> /min)	High hydrogen concentration (6% H <sub>2</sub> /min)
combustion heat value of hydrogen		142,900 kJ
power quantity of circulator <sup>a</sup>		40 Wh (=144 kJ)
Time taken to oxidize 1 kg H <sub>2</sub>	83 h	17 h
Energy required for circulator <sup>b</sup>	11,952 kJ	2,448 kJ
Energy recovered	130,948 kJ	140,452 kJ
Ratio of oxidation heat/circulator energy	11.9	71.45

<sup>a</sup>: spec of circulator is 2,000 L/h    <sup>b</sup>: 1 kg H<sub>2</sub> oxidative heat recovery energy

Table 3. Comparing Heat Recovery Energy Efficiency

Value	Ideal condition	Real condition	
combustion heat value of hydrogen		142,900 kJ	
power quantity of circulator <sup>a</sup>		40 Wh (= 144 kJ)	
Time taken to oxidize 1 kg H <sub>2</sub>		83 h	
Efficiency of heat recovery	100%	60%	40%
Energy required for circulatory <sup>b</sup>	11,952 kJ	19,920 kJ	29,880 kJ
Energy recovered	130,948 kJ	122,980 kJ	113,020 kJ
Ratio of oxidation heat/circulator energy	11.96	7.17	4.78

<sup>a</sup>: spec of circulator is 2,000 L/h    <sup>b</sup>: 1 kg H<sub>2</sub> oxidative heat recovery energy

#### 4. 결 론

본 연구에서는 하이브리드 철도 차량과 연계되는 수소 산화 촉매의 열에너지를 회수하기 위한 유체 온도 향상 방안 연구를 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 수소 에너지 기술의 고도화된 발전에도 불구하고 최근까지 발생한 폭발사고로 인해 수소 안전성 문제가 계속해서 제기되는 현 실정에 본 연구개발 기술은 예상치 못한 수소 에너지 관련 사고를 막을 수 있는 수소 직접 제거기술로 활용될 수 있다.

2. 누출된 수소 산화 및 열 회수를 목적으로 함에 따라, 수소연료 전지의 미반응 수소 농도인 1~6% H<sub>2</sub> 농도를 기준으로 산화열을 회수하였으며, 열 회수 시스템의 경우에도 물의 순환 외 별도의 에너지가 들어가지 않는 설계 안을 제안하였다. 또한 약 33 LPM급 펌프에 소요되는 전력과 소비에너지를 고려했을 때 약 100,000 kJ 이상(1% 저농도 수소 발생 기준)의 에너지를 회수하여 온수 가열에 활용할 수 있음을 확인하였다.

3. 회수된 열은 온수와 같은 철도차량 내 서비스 제공과 같은 기능으로 활용될 가능성을 확인하였으며, 추후 스케일 업을 통한 폐열 회수 시스템 연계 및 온수 제공을 위한 실증화 운전 연구와 폐열 회수 시 소요되는 전력량을 추적한 경제성 평가 후속 연구가 필요할 것으로 판단된다.

#### 감 사

본 연구는 2020학년도 경기대학교 대학원 연구원장학생 장학금 지원에 의하여 수행되었음.

#### References

1. S. Lee, K. Kim, D. Ko, Y. Yoon, and Y. Cho, An experimental study on the combustion and emission characteristics of hydrogen enriched lpg fuel in a constant volume chamber, *Transaction of the Korean Hydrogen and New Energy Society*, **23**, 227-235 (2012).
2. P. Biswas and C. Y. Wu, Control of toxic metal emissions from combustors using sorbents: A Review, *J. Air Waste Manag. Assoc.*, **48**, 113-127 (1998).
3. Y. Manohara, S. E. Hosseini, B. Butler, H. Alzahrani, B. T. F. Senior, T. Ashuri, and J. Krohn, Hydrogen fuel cell vehicles; current status and future prospect, *Appl. Sci.*, **9**, 2296 (2019).
4. S. E. Hosseini, A. M. Andwari, M. A. Wahid, and G. Bagheri, A

review on green energy potentials in Iran, *Renew. Sust. Energ. Rev.*, **27**, 533-545 (2013).

5. M. Granovskii, I. Dincer, and M. A. Rosen, Greenhouse gas emissions reduction by use of wind and solar energies for hydrogen and electricity production: Economic factors, *Int. J. Hydrog. Energy*, **32**, 927-931 (2007).
6. L. Giorgil and F. Leccese, Fuel cells: Technologies and applications, *The Open Fuel Cells Journal*, **6**, 1-20, (2013).
7. A. Kerviel, A. Pesyridis, A. Mohammed, and D. Chalet, An evaluation of turbocharging and supercharging options for high-efficiency fuel cell electric vehicles, *Appl. Sci.*, **8**, 2474 (2018).
8. C. Wang, M. H. Nehrir, and H. Gao, Control of PEM fuel cell distributed generation systems, *IEEE Trans. Energy Convers.*, **21**, 586-595 (2006).
9. T. Somekawa, K. Nakamura, T. Kushi, T. Kume, K. Fujita, and H. Yakabe, Examination of a high-efficiency solid oxide fuel cell system that reuses exhaust gas, *Appl. Therm. Eng.*, **114**, 1387-1392 (2017).
10. M. Y. Ayad, M. Becherif, and A. Henni, Vehicle hybridization with fuel cell, supercapacitors and batteries by sliding mode control, *Renew. Energ.*, **36**, 2627-2634 (2011).
11. U. K. Chakraborty, A new model for constant fuel utilization and constant fuel flow in fuel cells, *Appl. Sci.*, **9**, 1066 (2019).
12. A. Costilla-Reyes, C. Erbay, S. Carreon-Bautista, A. Han, and E. Sanchez-Sinencio, A time-interleave-based power management system with maximum power extraction and health protection algorithm for multiple microbial fuel cells for internet of things smart nodes, *Appl. Sci.*, **8**, 2404 (2018).
13. S.-M. Lim, S.-W. Sung, Y.-K. Lee, and J.-W. Kim, Technical trends of hydrogen fuel cell railway rolling stock, *2018 Annual Meeting and Autumn Conference of the Korean Society for Railway*, October 18-19, Jeju, Korea (2018).
14. C. Kim and S. Kim, Technology development trends for environmentally friendly hydrogen railway vehicles, *Railw. J.*, **23**, 15-20 (2020).
15. H. J. Ahn, S. H. Lee, N. Hur, M. K. Lee, and G. Yong, The numerical simulation of hydrogen jet diffusion for hydrogen leakage in the enclosed geometry, *J. Comput. Fluids Eng.*, **14**, 32-38 (2009).
16. H. Xie, X. Li, and D. M. Christopher, Emergency blower ventilation to disperse hydrogen leaking from a hydrogen-fueled vehicle, *Int. J. Hydrog. Energy*, **40**, 8230-8238 (2015).
17. H. W. Ji, H. Lee, I. Hwang, and H. Jang, Safe ventilation methods against leaks in hydrogen fuel cell rooms in homes, *Energies*, **15**, 5434 (2022).

18. M. R. Swain and M. N. Swain, Passive ventilation systems for the safe use of hydrogen, *Int. J. Hydrogen Energy*, **21**, 823-835 (1996).
19. D. Lomot and Z. Karpinski, Hydrogen oxidation over alumina-supported palladium-nickel catalysts, *Res. Chem. Intermed.*, **41**, 9171-9179 (2015).
20. D. Y. Lee and S. S. Kim, A Study on the H<sub>2</sub> oxidation over Pt/TiO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> poisoning and regeneration, *Appl. Chem. Eng.*, **30**, 731-736 (2019).
21. S. A. Singh, K. Vishwanath, and G. Madras, Role of hydrogen and oxygen activation over Pt and Pd-doped composites for catalytic hydrogen combustion, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **9**, 19380-19388 (2017).
22. Y. Jang, S. M. Lee, and S. S. Kim, Effect of a modified 13X zeolite support in Pd-based catalysts for hydrogen oxidation at room temperature, *RSC Adv.*, **11**, 38047-38053 (2021).
23. Y. Jang, S. M. Lee, and S. S. Kim, A optimization study on the preparation and coating conditions on honeycomb type of Pd/TiO<sub>2</sub> catalysts to secure hydrogen utilization process safety, *J. Korea Org. Resour. Recycl. Assoc.*, **29**, 47-54 (2021).
24. H. Jouhara, N. Khordehgah, S. Almahmoud, B. Delpech, A. Chauhan, and S. A. Tassou, Waste heat recovery technologies and applications, *Therm. Sci. Eng. Prog.*, **6**, 268-289 (2018).
25. H. Eom, Y. Jang, S. Y. Choi, S. M. Lee, and S. S. Kim, Application and regeneration of honeycomb-type catalysts for the selective catalytic oxidation of H<sub>2</sub>S to sulfur from landfill gas, *Appl. Catal. A-Gen.*, **590**, 117365 (2020).
26. J. Lyer, T. Moore, D. Nguyen, P. Roy, and J. Stolaroff, Heat transfer and pressure drop characteristics of heat exchangers based on triply periodic minimal and periodic nodal surfaces, *Appl. Therm. Eng.*, **209**, 118192 (2022).

#### Authors

Youngee Jang; Ph.D., Student, Department of Environmental Energy Engineering, Graduate School of Kyonggi University, Suwon-si 16227, Korea; yhj39@kyonggi.ac.kr

Sung Su Kim; Ph.D., Professor, Department of Environmental Energy Engineering, Kyonggi University, Suwon-si 16227, Korea; sskim@kyonggi.ac.kr