

# CeO<sub>2</sub>/ZrO<sub>2</sub> Foam Device를 이용한 고온 태양열 열화학 사이클의 수소 생산

## Hydrogen Production with High Temperature Solar Heat Thermochemical Cycle using CeO<sub>2</sub>/ZrO<sub>2</sub> Foam Device

이진규\* · 서태범\*\*†

Lee Jin-Gyu\* and Seo Tae-Beom\*\*†

(Submit date : 2014. 10. 2., Judgment date : 2014. 10. 6., Publication decide date : 2014. 12. 19.)

**Abstract :** Two-step water splitting thermochemical cycle with CeO<sub>2</sub> foam device was investigated by using a solar simulator composed of 2.5 kW Xe-Arc lamp and mirror reflector. The hydrogen production of CeO<sub>2</sub> foam device depending on reaction temperature of Thermal-Reduction step and Water-Decomposition step was analyzed, and the hydrogen production of CeO<sub>2</sub> and NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/ZrO<sub>2</sub> foam devices was compared. As a result, the amount of reduced CeO<sub>2</sub> considerably varies according to the reaction temperature of Thermal-Reduction step, and hydrogen production was not much when the amount of reduced CeO<sub>2</sub> decreased even if the reaction temperature of Water-Decomposition step was high. Therefore, it is very important to keep the reaction temperature of Thermal-Reduction step high in two-step thermochemical cycle with CeO<sub>2</sub>.

**Key Words :** 접시형 태양열 집열 시스템(Dish type solar thermal system), 2단계 물분해(Two-step water splitting), 수소생산(Hydrogen production), 인공 태양 모사장치(Solar simulator), 다공성 폼(Porous foam device)

### 1. 서 론

현재 사용되는 석유, 석탄, 천연가스 등과 같은 화석연료는 사용 후 재생이 불가능하고 매장량이 한정되어 있으며 연소 시 발생하는

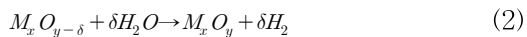
공해물질로 인해 환경문제를 야기한다.<sup>1)</sup> 이러한 맥락에서 차세대의 이상적인 대체에너지로써 가장 주목을 받는 것이 수소에너지이다. 에너지 수송체로서의 수소는 신재생에너지의 화학적 형태로의 수송 및 저장을 가능하게 하는

\*\*† 서태범(교신저자) : 인하대학교 기계공학과  
E-mail : seotb@inha.ac.kr, Tel : 032-874-7327  
\*이진규 : 인하대학교 기계공학과

\*\*† Seo Tae-Beom(corresponding author) : Department of Mechanical Engineering, Inha University.  
E-mail : seotb@inha.ac.kr, Tel : 032-874-7327  
\*Lee Jin-Gyu : Department of Mechanical Engineering, Inha University.

해결책이 될 수 있고 연소 시 극소량의 NOx를 제외하고는 공해물질이 생성되지 않는 이점이 있으며, 물을 원료로 하여 제조할 수 있다는 점에서 향후 화석에너지 고갈에 대한 궁극적인 대안으로 각광받고 있다.<sup>2)</sup>

수소 제조의 이상적인 방법으로는 물의 직접 열분해 방법이 있다. 하지만 물의 분해를 위해 2500 K의 고온이 필요하며 H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>의 재결합을 방지할 수 있는 효과적인 H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> 분리 기술이 요구되기 때문에 실용화가 어려운 측면이 있다. 따라서 열화학적 물분해 사이클을 이용한 수소 생산 기술은 H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>의 효과적인 분리와 물의 직접 열분해보다 낮은 온도에서 물의 분해가 가능한 방법이 연구되고 있다.<sup>3)</sup> 이러한 측면에서 금속산화물의 산화·환원반응을 이용한 2단계 물분해 열화학 사이클은 상대적으로 낮고 기술적으로 태양열로 획득이 가능한 온도범위에서 수소 생산이 가능하다. 2단계 물분해 열화학 사이클은 단계별로 H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>의 분리가 가능하고 상대적으로 낮은 온도에서 수행되기 때문에 화학반응기의 재질에 대한 제약이 완화되는 장점이 있다. 이 사이클은 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/FeO 산화-환원 쌍을 사용하는 Nakamura에 의해 최초로 제안되었다.<sup>4)</sup> 금속산화물을 산화·환원쌍으로 하는 2단계 물분해 열화학 사이클은 일반적으로 아래와 같다.



식(1)은 T-R(Thermal Reduction) 단계로써 금속산화물이 태양열을 열원으로 하여 열적 환원과정을 거칠 때 산화물로부터 산소가 배출된다. 식(2)는 W-D(Water Decomposition)

단계로 상대적으로 낮은 온도에서 환원된 금속산화물이 수증기와 반응하여 금속산화물은 다시 산화되고 그 과정에서 수소가 발생하게 된다. 이렇게 하여 산화된 금속산화물은 다시 T-R 단계를 수행하게 된다.

태양열 2단계 물분해 열화학 사이클에서 고반응성을 나타내는 NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>에 대한 연구와 더불어 NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>에 비해 녹는점이 높고 소결저항성이 우수하여 중간층의 사용없이 반응지속성이 뛰어난 CeO<sub>2</sub>에 대한 연구가 중점적으로 이루어지고 있다.

Kodama 등은 “ZrO<sub>2</sub>-supported ferrite processes”라고 불리우는 단사정계 ZrO<sub>2</sub>를 중간층으로 하는 페라이트 분말을 이용하여 처음으로 2단계 열화학적 물분해 사이클을 반복적으로 수행하였다.<sup>5)</sup> Gokon 등은 인공 태양 모사 장치를 이용하여 NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>가 코팅된 세라믹 다공성 폼에 빛을 직접 조사하여 물분해 성능을 알아보았다.<sup>6)</sup> Martin Roeb 등은 다공성 폼을 대체하여 페라이트가 코팅된 모노리스 허니컴을 이용하여 산화환원을 순차적으로 1073 K과 1473 K의 온도에서 진행하였다.<sup>7)</sup> CeO<sub>2</sub>에 대한 연구로는 Gokon 등이 powder상태의 CeO<sub>2</sub>에 대해 온도에 따른 각 단계별 H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> 생산량과 반응지속성 등을 알아보기 위해 1300-1550 °C의 온도조건에서 T-R 단계를, 400-1000 °C의 온도 조건에서 W-D 단계를 진행하였다.<sup>8)</sup>

본 연구에서는 인공 태양 모사 장치를 이용하여 CeO<sub>2</sub>에 대한 2단계 물분해 열화학 사이클 실험을 수행하였다. CeO<sub>2</sub>는 ZrO<sub>2</sub> 다공성 폼에 코팅하여 태양열 흡수율을 높였으며 T-R 단계와 W-D 단계의 반응온도에 따른 수소 생산량을 분석하였다. 또한, CeO<sub>2</sub>의 반응특성은 NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/ZrO<sub>2</sub>의 수소 생산량과 비교하였다.

## 2. 실험장치

### 2.1 CeO<sub>2</sub>/ZrO<sub>2</sub> 다공성 폼

CeO<sub>2</sub>는 열적안정성이 우수한 ZrO<sub>2</sub> 세라믹 다공성 폼 (Drache GmbH, Germany)에 코팅하였으며 ZrO<sub>2</sub> 세라믹 다공성 폼은 직경 50 mm, 두께 15 mm, 10 ppi로써 19.6 cm<sup>2</sup>의 면적을 갖는다. CeO<sub>2</sub> 코팅은 먼저 ZrO<sub>2</sub> 세라믹 다공성 폼을 D.I water에 적신 후, 그 표면에 mesh를 이용하여 20 wt%의 CeO<sub>2</sub>를 균일하게 분산시켰다. 그 후 분산된 CeO<sub>2</sub>에 micropipette을 이용하여 D.I water를 분사하고 heating gun으로 완전 건조시켰다. ZrO<sub>2</sub> 세라믹 다공성 폼에 원하는 무게를 코팅하기 위해서 위와 같은 방법을 반복하였다. NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/m-ZrO<sub>2</sub>/ZrO<sub>2</sub> 다공성 폼은 20 wt%의 질량분율로 제조하였으며 제조 과정은 선행연구와 같다.<sup>9)</sup>

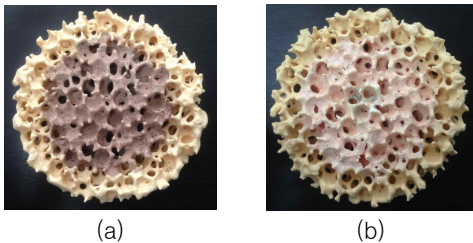


Fig. 1 Metallic oxide (a)NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/m-ZrO<sub>2</sub>/ZrO<sub>2</sub> foam device  
(b)CeO<sub>2</sub>/ZrO<sub>2</sub> foam device

### 2.2 인공 태양 모사 장치

인공 태양 모사 장치는 열화학 사이클의 T-R 단계 및 W-D 단계에서 필요한 고온을 얻기 위한 열원으로 사용되었으며 2.5 kW Xe-Arc lamp와 반사판으로 구성되었고 실제 solar furnace와 동일하게 지면과 수평으로 설치되었다. 인공 태양 모사 장치의 운용은 금속 산화물이 코팅된 다공성 폼의 중심부에 초점을 맞춘 뒤 다공성 폼의 직경만큼 focal spot

을 넓혀주어 온도를 측정하면서 T-R, W-D 단계의 온도를 만족할 때까지 전력량을 조절해 가면서 안정화를 시켰다. 전력량은 다공성 폼에 열충격을 방지하기 위하여 0.1 kW단위로 10분씩 예열하면서 증가시켰다.



Fig. 2 Solar simulator

### 2.3 화학반응기

반응기는 원통형의 inconel로 제작하였고 금속산화물이 코팅된 다공성 폼을 장착할 수 있도록 2개의 분리형으로 제작하였다. 반응기의 전면부는 quartz window(10 mm, 5 t)를 커버로 사용하여 조사되는 빛을 통과시킴과 동시에 반응 및 생성 가스가 반응기 외부로 유입/유출 되는 것을 방지하고자 하였다. 또한 고온으로 인한 금속의 열팽창이 quartz window를 파손할 우려가 있기 때문에 quartz window가 삽입된 반응기 전면부는 항온조를 이용하여 10 ℃의 냉각된 물을 전체 반응기간 동안 순환시켰다.

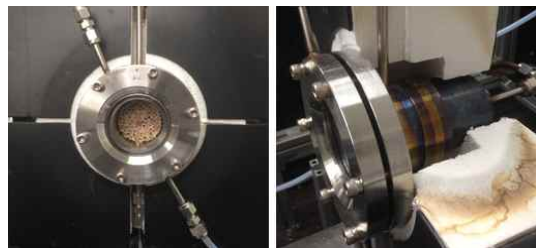


Fig. 3 Chemical reactor

반응기의 내부 유로는 SUS 튜브를 사용하였으며 다공성 폼의 온도가 T-R, W-D 단계의 온도가 충족되는 것을 확인하기 위하여 다공성 폼 전면부의 중심에 R-type 열전대를 삽입하여 온도를 측정하였다.

### 3. 실험방법

그림 4와 5는 2단계 열화학 사이클의 실험 장치 개략도와 전체적인 실험 과정을 나타낸 것으로써 N<sub>2</sub> gas purging, T-R step, W-D step의 총 3단계로 구성되어 있다.

N<sub>2</sub> gas purging 단계에서는 실험 시작 시 T-R 단계 유로를 통해 순도 99.999 %의 N<sub>2</sub>를 30분간 공급하였다. 이 때 사용되는 N<sub>2</sub>는 gas는 반응물 및 생성물의 운반 기체로 사용되는 동시에 Purging 단계에서 유로 내부의 이물질 제거 및 유로 파손 여부를 판단하는 역할을 수행한다.

T-R step은 금속산화물의 환원 반응이 진행되는 단계로써 1400 °C 이상의 온도를 필요로 한다. 인공 태양 모사 장치를 조절하여 다공성 폼의 중심부 온도를 1400 °C로 유지하였다. T-R 단계에서 다공성 폼 중심부 온도가 1400 °C로 설정된 시점부터 30분 동안 T-R step을 진행하였다. 또한 MFC를 사용하여 N<sub>2</sub> 가스가 0.3 LPM의 유량으로 생성 가스를 운반하도록 설정하였다.

W-D step은 환원 반응을 통해 산소가 분리된 금속산화물에 수증기를 공급하여 수소를 생산하는 과정이다. 금속산화물의 산화 반응이 진행되는 단계로써 1000 °C 이상의 온도를 필요로 하며, 수소의 발생이 중단될 때까지 진행하였다. 보통 한 사이클이 진행되는 동안 약 30분의 시간이 소요되었다. 수증기 공급이 필요한 과정이므로 T-R 단계에서 W-D 단계로

전환되는 시점부터 수증기 공급 장치가 가동된다. 또한 화학 반응을 거치고 나온 생성 가스를 냉각장치를 거치도록 하여 수분을 분리하고, 0.5 ml 용량의 실린지를 사용하여 3분마다 포집하였다. 포집된 가스는 가스 크로마토그래피(Agilent 7890A)를 이용하여 성분을 분석하였다.

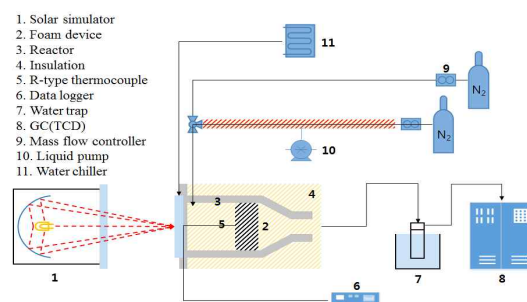


Fig. 4 Schematic diagram of experimental equipment

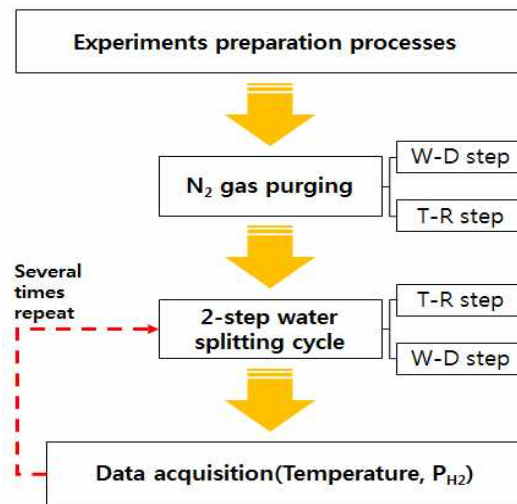


Fig. 5 Experiment flowchart of thermochemical cycle

### 4. 결과 및 고찰

인공 태양 모사 장치를 이용한 CeO<sub>2</sub>의 반응 온도에 따른 수소 생산량을 분석하기에 앞서

비교적 많은 연구가 진행되어 수소 생산량 및 사이클 반복성에서 뛰어난 성능을 나타낸 NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/ZrO<sub>2</sub>와의 비교 실험을 진행하였다. 실험은 총 5 사이클 동안 진행되었다.

그림 6은 T-R 단계 1400 °C, W-D 단계 1000 °C 조건에서 각 금속산화물에 대해 5 사이클 중 첫 번째 사이클의 수소 생산량을 나타낸 것이다. T-R 단계는 다공성 폼의 중앙부분 온도가 1400 °C에 도달한 뒤 30분 동안 진행되었고 W-D 단계는 1000 °C의 온도 조건에서 수증기를 공급한 뒤 각 금속산화물에 대해 수소가 검출될 때까지 수행하였다. NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/ZrO<sub>2</sub>와 CeO<sub>2</sub>의 첫 번째 사이클의 수소 생산량은 2.21 ml과 1.85 ml로 나타났으며, 평균 수소 생산량은 2.31 ml, 2.09 ml로 CeO<sub>2</sub>에 비해 NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/ZrO<sub>2</sub>의 수소 생산량이 우수한 것을 알 수 있었다. 하지만 CeO<sub>2</sub>의 경우 반응시간이 30분인 것에 반해 NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/ZrO<sub>2</sub>는 60분에 도달해야 수소의 검출이 완료되는 것을 알 수 있었다. 이는 태양열을 이용하여 수소를 생산할 경우 반응시간 측면에서 유리한 CeO<sub>2</sub>가 하루 동안 더 많은 사이클을 수행할 수 있어 전체적인 수소 생산량은 증가할 것으로 예측할 수 있다.

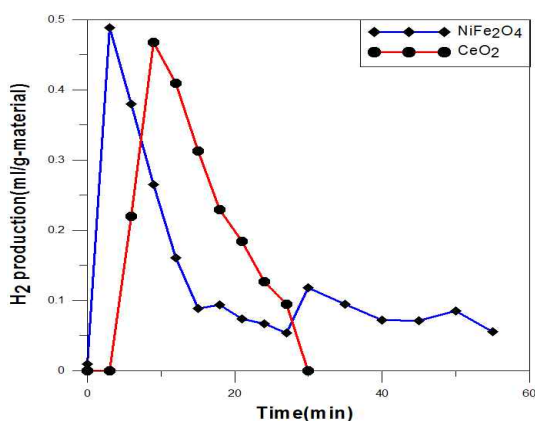


Fig. 6 Hydrogen production of NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/ZrO<sub>2</sub> and CeO<sub>2</sub> (1st cycle)

표 1과 그림 7은 1~5사이클 동안 CeO<sub>2</sub>와 NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/ZrO<sub>2</sub>의 수소 생산량과 평균 수소 생산량을 비교한 것이다. NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/ZrO<sub>2</sub>와 CeO<sub>2</sub>는 최적 반응온도가 다르지만 실제 접시형 태양열 시스템에서 이용할 수 있는 온도영역이 1400 °C인 것을 고려하여 1400 °C에서의 수소 생산량을 비교하였다. 수소 생산량은 5 사이클 동안 비교적 일정하게 나타났으며 전체적으로 NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/ZrO<sub>2</sub>의 수소 생산량이 우수한 것을 알 수 있었다.

Table. 1 Comparison of hydrogen production (1~5)

H <sub>2</sub> production (ml/g-material)	Material	
	NiFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> /m-ZrO <sub>2</sub> /ZrO <sub>2</sub> foam	CeO <sub>2</sub> /ZrO <sub>2</sub> foam
1st	2.21	1.85
2nd	2.17	1.88
3rd	2.37	2.28
4th	2.44	2.19
5th	2.40	2.28
Ave.	2.31	2.09

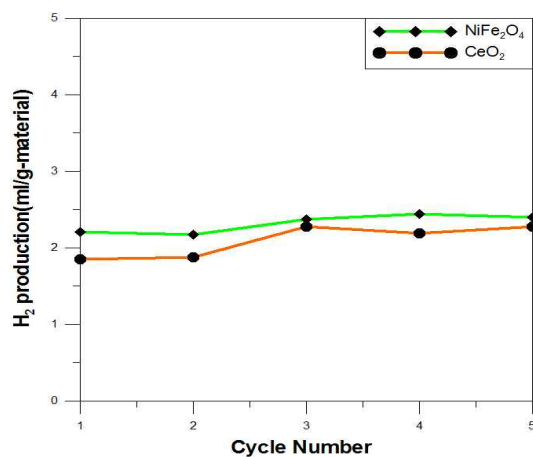


Fig. 7 Comparison of hydrogen production (1~5)

그림 8은 T-R 단계의 반응온도에 따른 수소

생산량을 나타낸 것이다. 반응온도는 1300 °C, 1400 °C, 1500 °C로 설정하였으며 각 T-R 단계의 반응온도에 대하여 W-D 단계의 반응온도는 1000 °C로 고정하였다. 3 사이클 동안의 평균 수소 생산량은 반응온도가 1300~1500 °C로 증가할 때 0.31 ml에서 3.14 ml로 크게 증가하는 것을 알 수 있다. 또한 T-R 단계의 반응온도가 낮아질수록 수소 생산은 상대적으로 천천히 진행되어 빠르게 종료되는 것을 알 수 있다. 표 2는 T-R 단계 온도에 따른 CeO<sub>2</sub>의 1~3사이클 동안의 수소 생산량을 나타낸 것이며 사이클이 진행되는 동안에 수소 생산량은 비교적 일정하게 나타났다.

Table. 2 Hydrogen production of CeO<sub>2</sub> depending on T-R step temperature (1st cycle)

H <sub>2</sub> production (ml/g-material)	T-R Temperature		
	1300°C	1400°C	1500°C
1st	0.31	1.85	3.08
2nd	0.29	1.88	3.19
3rd	0.33	2.28	3.16
Ave.	0.31	2.01	3.14

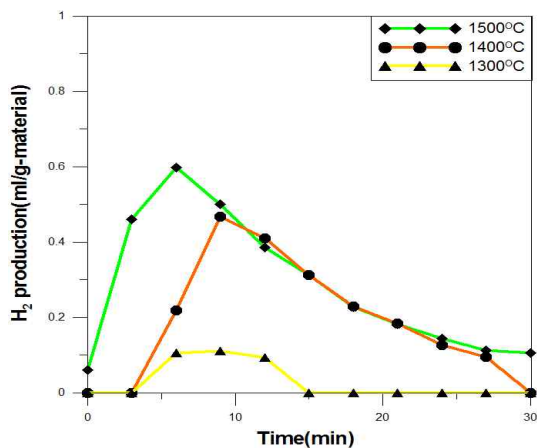


Fig. 8 Hydrogen production of CeO<sub>2</sub> depending on T-R step temperature (1st cycle)

그림 9는 T-R 단계의 반응온도를 1400 °C로 고정하고 W-D 단계 반응온도를 1000 °C, 750 °C, 500 °C로 변화시켜가며 CeO<sub>2</sub>에 대한 열화학 사이클을 수행한 것이다. W-D 단계 반응온도에 따른 수소 생산량은 반응 온도가 감소할수록 수소 생산량도 감소하는 경향을 보였다. 하지만 1000 °C에서 500 °C로 반응온도가 감소할 때 수소 생산량은 2.01 ml에서 1.38 ml로 감소하여 비교적 적은 감소폭을 보였다.

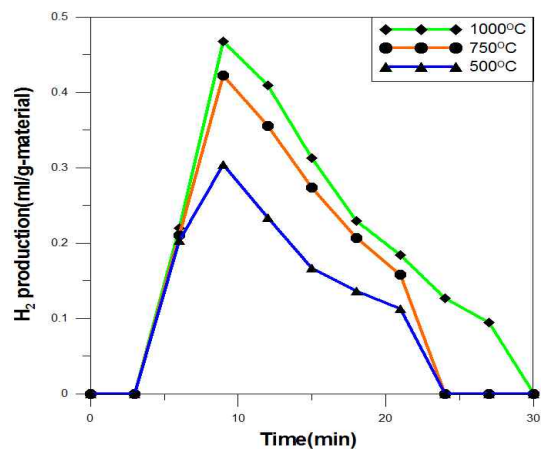


Fig. 9 Hydrogen production of CeO<sub>2</sub> depending on W-D step temperature (1st cycle)

Table. 3 Hydrogen production of CeO<sub>2</sub> depending on W-D step temperature (1~3)

H <sub>2</sub> production (ml/g-material)	W-D Temperature		
	1000°C	750°C	500°C
1st	1.85	1.62	1.15
2nd	1.88	1.30	1.33
3rd	2.28	1.44	1.66
Ave.	2.01	1.45	1.38

그림 8과 9를 통하여 T-R 단계의 반응온도가 전체 수소 생산량에 미치는 영향이 큰 것

을 확인할 수 있었다. 즉 T-R 단계의 반응온도에 따라서 환원되는 CeO<sub>2</sub>의 양이 크게 달라지는 것을 알 수 있으며 환원되는 CeO<sub>2</sub>의 양이 감소하면 W-D 단계의 반응온도가 높아도 생산되는 수소의 양이 제한적일 수 밖에 없음을 확인할 수 있다. 반면에 T-R 단계에서 환원되는 CeO<sub>2</sub>의 양이 동일하면 W-D 단계의 반응온도는 크게 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 이를 통해 CeO<sub>2</sub>를 이용한 2단계 열화학 사이클은 T-R 단계의 반응온도를 확보하는 것이 매우 중요하며 상대적으로 W-D 단계 반응온도는 NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 등의 다른 금속 산화물에 비해 덜 민감한 것으로 확인되었다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 인공 태양 모사 장치를 이용하여 CeO<sub>2</sub>에 대한 2단계 물분해 열화학 사이클 실험을 수행하였다. T-R 단계와 W-D 단계의 반응온도에 따른 수소 생산량을 분석하였으며, CeO<sub>2</sub>의 반응특성은 NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/ZrO<sub>2</sub>의 수소 생산량과 비교하였다. 연구의 결론은 다음과 같다.

- (1) CeO<sub>2</sub>와 NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/ZrO<sub>2</sub>의 수소 생산량 비교 실험은 총 5 사이클 동안 진행되었으며, 수소 생산량은 사이클이 진행되는 동안 비교적 일정하게 나타났고 전체적으로 NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/ZrO<sub>2</sub>의 수소 생산량이 우수한 것을 알 수 있었다.
- (2) CeO<sub>2</sub>의 경우 W-D 단계 시간이 30분인 것에 반해 NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/ZrO<sub>2</sub>는 60분에 도달해야 수소의 검출이 완료되는 것을 알 수 있었으며, 이는 반응시간 측면에서 유리한 CeO<sub>2</sub>가 하루 동안 더 많은 사이클을 수행할 수 있어 전체적인 수소 생산량은 증가할 것으로 예측할 수 있다.
- (3) T-R 단계 반응온도에 따른 열화학 사이클 실험에서 평균 수소 생산량은 반응 온도가

1300 °C에서 1500 °C로 증가할 때 0.31 ml에서 3.14 ml로 크게 증가하는 것을 알 수 있다. 또한 T-R 단계의 반응온도가 낮아질수록 수소 생산은 상대적으로 천천히 진행되어 빠르게 종료되는 것을 알 수 있다.

- (4) W-D 단계 반응온도에 따른 수소 생산량은 반응 온도가 감소할수록 수소 생산량도 감소하는 경향을 보였다. 하지만 1000 °C에서 500 °C로 반응온도가 감소할 때 수소 생산량은 2.01 ml에서 1.38 ml로 감소하여 비교적 적은 감소폭을 보였다.
- (5) CeO<sub>2</sub>를 이용한 2단계 열화학 사이클은 T-R 단계의 반응온도를 확보하는 것이 매우 중요하며 상대적으로 W-D 단계 반응온도는 NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 등의 다른 금속 산화물에 비해 덜 민감한 것으로 확인되었다.

본 연구 결과를 기반으로 향후 사이클을 증가시켜 수소 생산량을 증가시킬 목적으로 Dual reactor에 대한 실험을 하고자 한다. 이를 통해 단일 반응기에서 T-R 단계 후 W-D 단계를 모두 수행하여 하루 동안 제한된 사이클을 수행할 수밖에 없는 현재의 시스템에서 탈피하여 열화학 사이클의 수를 증가시켜 수소 생산성을 증가시키고자 한다.

## 후 기

이 논문은 2013년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No.2013R1A2A2A01014903).

## Reference

1. Laherrere, J., Forecate of Oil and Gas Supply to 2050, Petrotech 2003 NewDelhi, 2003.

2. Lee, J. Y., Yi, Y. m., Uhm, S. h., Understanding Underlying Processes of Water Electrolysis, J. Korean Ind. Eng. Chem., Vol. 19, No. 4, pp. 357~365, 2008.
3. Steinfeld, A., Solar Thermochemical Production of Hydrogen - a Review, Solar Energy, Vol. 78, pp. 603~615, 2005.
4. Nakamura, T., Hydrogen Production from Water utilizing Solar Heat at High Temperatures, Solar Energy, Vol. 19, pp. 467~475, 1977.
5. Kodama, T., Nakamuro, Y., Mizuno, T., A Two-step Thermochemical Water Splitting by Iron-oxide on Stabilized Zirconia, Journal of Solar Energy Ebgineering(ASME), Vol. 128, pp. 3~7 2004.
6. Gokon, N., Murayama, H., Nagasaki, A., Kodama, T., Thermochemacal Two-step Water Splitting Cycles by Monoclinic ZrO<sub>2</sub>-supported NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> and Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> Powders and Ceramic Foam Devices, Solar Energy, Vol. 83, pp. 527~537, 2009.
7. Roeb, M., Neises, M., Sack, J., Rietbrock, P., Monnerie, N., Dersch, J., Schmitz, M., Sattler, C., Operational Strategy of a Two-step Thermochemical Process for Solar Hydrogen Production, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 34, pp. 4537~4545, 2009.
8. Gokon, N., Sagawa, S., Kodama, T., Comparative Study of Activity of Cerium Oxide at Thermal Reduction Temperatures of 1300 to 1550 °C for Solar Thermo-chemical 2-step Water-Splitting cycle, International journal of hydrogen Energy, Vol. 38, pp. 14402~14414, 2013,
9. Shin, Y. W., Kim, T. J., Jung, Y. G., Lee, J. G., Seo, T. B., Hydrogen Production via Thermochemical Cycle using High Temperature Solar Heat, The Korean Solar Energy Society, Vol. 04, pp. 208~213, 2010.