

초고온 태양열을 이용한 태양연료 생산기술 연구동향

강 용혁¹⁾, 김 진수²⁾, 이 상남³⁾, 윤 환기⁴⁾, 유 창균⁵⁾

Review on the Solar Fuel Production Technology Using High-Temperature Solar Furnace

Yong-Heack Kang, Jin-Soo Kim, Sang-Nam Lee, Hwan-Ki Yoon, Chang-Kyun Yu

Key words : solar thermal(태양열), solar furnace(태양로), solar chemistry(태양화학), solar fuel(태양연료), hydrogen production(수소생산)

Abstract : Solar fuel production technology using high-temperature solar furnace was briefly reviewed in this paper. 'Hydrogen' which is known to be the most promising energy carrier in the near future is to be generated environment-friendly from non-carbon resources. Combination of solar furnace operated by concentrated solar energy and high-temperature thermal reactions could be one of the most efficient ways to fulfill this need eventually. Various reaction mechanisms are feasible within a wide spectrum of solar fuel production technology, but intensive research efforts in related key areas need to be taken for successful development and commercialization of the technology.

1. 서 론

본 논문은 지구상에서 가장 풍부한 신재생에너지 자원인 태양에너지의 차세대 첨단 활용을 위하여, 초고온 태양열 집광 및 태양열 화학반응을 이용하여 수소 등 이송 가능한 형태의 태양연료를 생산하는 기술에 관한 소개와 최근의 연구동향에 관한 것이다.

차세대 에너지 산업은 기존의 화석연료를 기반으로 하는 영역에서 태양에너지를 기반으로 하는 영역으로 그 전환이 빠르게 진행되어 나아갈 전망이다. 이러한 과도기적 시기의 에너지 산업의 재편을 능동적이고 선행적으로 주도하여 에너지 패러다임의 변화에 적극적으로 대비할 필요가 있다. 이와 더불어 수소경제의 급팽창에 따라 증가되는 수소의 수요를 어떻게 환경 친화적으로 충족시킬 것인가 하는 것은 중요한 문제로 신재생 에너지를 에너지원으로 하는 친환경적 수소 생산 기술은 수소경제의 도래와 아울러 반드시 실현되어야 할 필수적이고 경쟁력 있는 미래기술이라 할 수 있다.

고집광 태양에너지에 기초한 초고온 태양열 활용 기술은 수소와 같은 유용한 에너지저장/수송 매체를, 궁극적으로는 이산화탄소의 배출 없이 생산할 수 있다는 측면에서, 또한 기존의 태양에너지 활용 효율 및 한계를 뛰어넘는 다양화된 복합 활용이 가능하다는 측면에서, 미래 에너지 주권의 확보를 위해 서둘러 투자와 개발이 이루어져야 할 핵심 분야이다.

-
- 1) 한국에너지기술연구원 신재생에너지연구부
E-mail : yhkang@kier.re.kr
Tel : (042)860-3500 Fax : (042)860-3739
 - 2) 한국에너지기술연구원 신재생에너지연구부
E-mail : jnskim@kier.re.kr
Tel : (042)860-3549 Fax : (042)860-3739
 - 3) 한국에너지기술연구원 신재생에너지연구부
E-mail : snlee@kier.re.kr
Tel : (042)860-3223 Fax : (042)860-3739
 - 4) 한국에너지기술연구원 신재생에너지연구부
E-mail : hkyoon@kier.re.kr
Tel : (042)860-3513 Fax : (042)860-3739
 - 5) 한국에너지기술연구원 신재생에너지연구부
E-mail : ckyu@kier.re.kr
Tel : (042)860-3515 Fax : (042)860-3739

2. 초고온 태양로

일반적으로 초고온 태양로라고 하면 기존의 dish형 반사경 혹은 central tower 형 집광설비(혹은 CPC 형태의 2차 집광시스템을 추가로 설치)를 이용하여 최고 수천 K에 이르는 초고온을 얻어 화학반응을 수행하여 다양한 형태의 태양연료 획득이 가능토록 하는 설비이다.

2.1 집광 시스템

Fig 1 상단의 설비들은 좌로부터 각각 이스라엘(WIS), 미국(SNL), 그리고 스페인(PSA)에 구축되어 각종 초고온 태양에너지 활용 기술의 연구에 사용되어지고 있는 대규모 central tower형 초고온 집광설비이다. 이러한 설비들은 크기는 10 MW급에 이르는 대규모 장치로서 요구되는 온도조건에 따라 타워 내부에 2차 집광 장치를 설치하여 초고온 태양로로 이용한다. 하단의 설비들은 좌로부터 미국(NREL), 프랑스(CNRS), 스위스(PSI)에 구축된 실험용 태양로로서, 이들은 dish 형태의 1차 집광설비를 기본으로 하여 2차 집광 장치를 조합한 비교적 소형(수~수십 KW)의 초고온 집광 설비들이다.

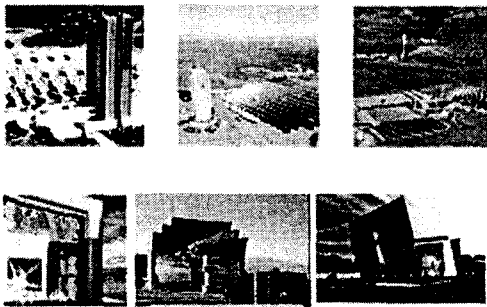


Fig. 1 High-temperature solar facility

2.1 반응 시스템

1,000 K 이상의 초고온 태양열 화학반응을 응용하는 고집광 태양에너지 활용을 위한 반응기는 효과적인 열전달을 위해 반응물과 집광된 태양에너지가 window를 사이에 두고 직접 접촉하는 형태를 가지고 있다. 이러한 형태로 실제 연구에 사용되고 있는 초고온 태양열화학반응기는 fig. 2에 그 개념도로 도시되어 있다. 먼저 상단의 세 반응기는 세계적으로 초고온 태양열화학반응 관련연구를 주도하고 있는 스위스 PSI의 태양반응기들로서 좌로부터 작동의 개념과 특성에 따라 rotating-cavity solar reactor, vortex-cavity solar reactor, two-cavity solar reactor로 명명

하고 있으며, 2,000 K 이상의 초고온에서 태양연료 생산을 위한 화학반응을 수행할 수 있다. 하단의 두 반응기는 각각 좌로부터 미국 NREL의 high-flux solar reactor 와 독일 DLR의 volumetric solar reactor를 개념도로 도시한 것으로 각각 메탄가스의 직접분해 및 메탄가스 수증기개질을 위한 반응기들로서 성공적인 동작을 실험적으로 검증받은 장치들이다.

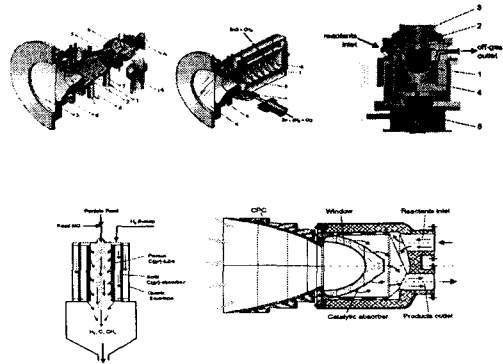


Fig. 2 High-temperature solar reactor⁽²⁾

3. 태양연료 생산

미래의 에너지 매체로 주목받고 있는 수소는 태양열 화학반응을 이용하여 얻을 수 있는 가장 일반적인 형태의 태양연료라 할 수 있다. Fig. 3은 수소를 태양에너지로부터 얻기 위한 다양한 반응 경로를 도시한 것이다. 이러한 경로에 의해 생산된 수소는 사용된 태양에너지의 비중이 다소 다르다고 할지라도 모두 태양연료의 한 형태라고 볼 수 있다. 수소생산의 관점에서 태양열화학을 이용하는 것은 이와 같이 수소원을 어디서 얻을 것인가 하는 문제에 따라 여러 가지 복잡 혹은 단순한 과정을 거치게 되는데, 모든 과정에서 공히 반응의 수행을 위한 에너지원은 태양으로부터 공급된다. 인류가 사용하는 에너지원은 나무 등과 같이 수소함량이 작은 물질로부터 시작하여 수소함량이 다소 높은 현재의 화석연료로 변화해 왔는데 미래에는 탄소를 포함하지 않는 물이 수소원으로서 유력한 매체가 될 것이 분명해 보인다.

Fig. 3은 우측의 가스화, 직접분해, 수증기개질과 같이 화석연료(혹은 물과의 혼합물)를 주요 수소원으로 하며 현존기술의 적용이 가능한 태양연료 생산기술로부터, 궁극적으로는 물과 태양열만을 이용하는 고효율 수소생산 기술이 어떠한 스펙트럼으로 연관되어 있는가 하는 것을 잘 나타내고 있다.

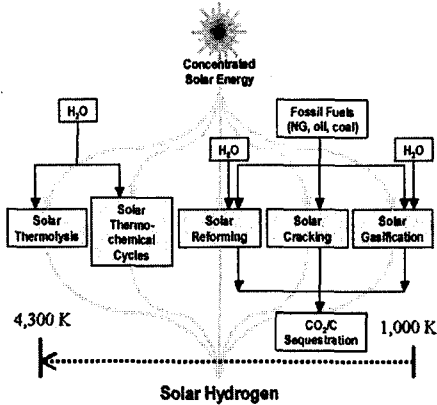


Fig. 3 Solar production of hydrogen⁽¹⁾

Fig. 4는 1,000K 내외의 온도에서 응용 가능한 다단계 물분해 화학반응 사이클로부터 4,000K 이상의 고온을 요구하는 직접 물분해 반응에 이르는 몇몇 주요 태양열 화학반응을 온도 별로 나열한 것이다. 이들 반응 중 현존 기술(집광, 반응, 재료, 분리 등 기술 확보)로서 응용이 가능한 온도영역은 약 2,000K 내외까지이다.

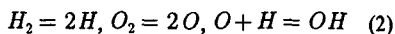
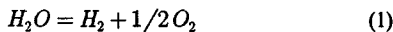
$H_2O = H_2 + 1/2O_2$		1단계 열분해
$M_xO_y = xM + y/2O_2$ $xM + H_2O = \gamma H_2 + M_xO_y$ $CH_4 = 2H_2 + C$	2000 K	2단계 물분해 메탄 분해
$CH_4 + CO_2 = 2H_2 + 2CO$ $CH_4 + H_2O = 3H_2 + CO$ UT-3, IS 사이클 등	1000 K	메탄 개질 다단계 물분해

Fig. 4 Solar thermal reactions and temperature

3.1 화학반응별 분류

3.1.1 직접 물분해⁽²⁾

탄소를 포함하지 않는 풍부한 수소원인 물을 효과적으로 분해하고자 하는 노력은 오래전부터 다양한 방법으로 시도되어져 오고 있는데 그 궁극적 목표는 물의 직접열분해이다. 고온에서 물이 분해될 때 수반되는 화학 반응들은 아래와 같다.

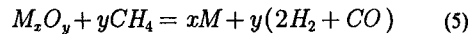
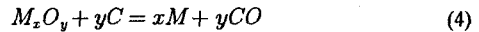


물이 열분해 되기 위해서는 최소 2,000K 이상의 고온을 필요로 하며, 예로 약 3,000K에서 불과 35% 정도가, 4,000K 이상의 온도에서는 대부분의 물이 수소와 산소로 분해된다. 아직까지는 이론적으로만 고려되고 있는 이러한 물의 직접열분해를 가능하도록 하기 위해서는 고온의 열원을 확보해

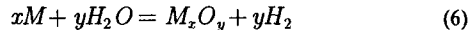
야 하며, 보다 중요한 문제로 고온에서 생성된 수소와 산소를 효과적으로 분리할 수 있어야 한다.

3.1.2 산화금속 환원반응 사이클^(1,2)

몇몇 금속은 직접 물분해의 경우보다 비교적 낮은 온도에서 간단한 2단계 화학반응 사이클을 통하여 물을 분해하여 수소를 제조하거나 직접 전기를 생산하는 등 에너지의 저장과 수송에 있어 매우 매력적인 매개체가 될 수 있다. 이를 위해서는 철이나 알루미늄, 아연 등 금속의 산화물이 환원 반응을 통하여 화학적으로 열분해 될 수 있어야 한다. 산화금속의 열분해를 고온 태양열을 이용하여 시도하고 있는 대표적인 화학반응은 산화금속의 직접열분해, 탄소를 환원제로 사용하는 열분해, 그리고 메탄(혹은 천연가스)을 환원제로 사용하는 열분해를 들 수 있는데 각각의 화학 반응식은 아래와 같다.



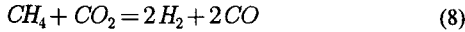
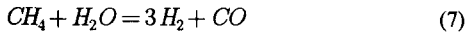
이러한 반응에 의하여 생성된 금속은 반응 (6)를 통하여 수소의 제조에 사용되고 반응물인 금속 산화물은 환원반응을 위해 재순환 된다.



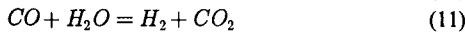
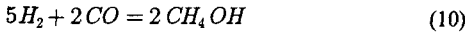
반응 (4-5)와 같이 탄소, 메탄 혹은 천연가스를 환원제로 사용하는 경우, 보다 낮은 온도에서 순수한 금속과, 합성가스를 반응물로 얻게 된다. 이때 반응 (5) 및 (6)를 통하여 일어나게 되는 전체적인 반응은 재순환되는 금속을 매개로 한 메탄의 수증기 개질반응과 동일하다고 할 수 있다.

3.1.3 메탄(천연가스 혹은 화석연료)의 개질 혹은 분해^(1,2)

가혹한 조건, 복잡한 반응 및 다양한 기술적 애로점을 가지고 있는 열화학반응들과 달리 화석연료인 메탄(천연가스)을 태양열을 이용하여 개질하여, 열함량이 높은 연료(upgraded fuel)를 얻거나 수소/메탄올 등의 연료로 전환시키는 공정은 중. 단기적으로 가장 현실성 있는 태양에너지활용 열화학반응 응용분야라 할 수 있다. 향후 수소에너지 응용분야의 확대와 더불어 소규모의 분산된 수소제조 및 공급시스템의 수요가 크게 증가할 것으로 예측됨에 따라, 자동차의 연료로 수소함량이 증가된 천연가스를 사용하거나, 분산형 발전시스템의 연료로서 합성가스를 사용하는 등 현실적으로 상용화가 가능한 많은 응용분야를 태양열에 의한 메탄(천연가스)의 개질 공정에 찾을 수 있다. 메탄의 개질 혹은 분해와 관련된 화학 반응은 크게 세 가지로 수증기 혹은 이산화탄소를 이용하는 경우와 직접 열분해 행하는 경우를 들 수 있는데 각각의 경우에 대한 반응식은 아래와 같다.



반응 (7) 과 (8)을 통하여 생성되는 합성가스는 고수소함유연료(HCNG)의 제조에 사용되어 자동차 등의 내연기관 혹은 발전을 위한 가스터빈의 연료로 사용되거나, 반응(10) 과 (11)에 의하여 메탄올이나 수소를 제조하는 데에 사용될 수 있다.



한편, 반응 (9)와 같이 천연가스 혹은 기타 화석연료를 직접 분해하여 수소를 생산할 수도 있는데, 이 경우 다른 반응의 경우보다 높은 온도를 요구하는 단점이 있으나 이산화 탄소의 배출이 없이 탄소만을 분리하여 처리(혹은 판매)하는 것이 가능하다는 이점을 가지고 있다.

3.1.4 다단계 물분해 열화학반응⁽³⁾

고온의 태양열을 이용한 에너지(수소에너지) 생산의 관점에서, 물을 직접 열분해하거나, 금속 산화물을 이용하는 2단계 화학반응 시스템을 이용하는 방법 이외에도 물로부터의 열화학적으로 수소를 제조하기 위해 수많은 다단계 반응사이클(UT-3, IS사이클 등)이 고려될 수 있다. 이러한 반응 사이클 들은 반응 온도를 낮추고 보다 안전하고 효율적인 공정을 찾고자 하는 연구의 결과로 얻어졌으며, 주로 원자력 폐열을 이용해 수소를 제조하고자 하는 목적으로 고려되었다. 다단계 물분해 열화학반응 사이클은 다단계 반응에 따른 분리의 어려움, 위험한 화학물질의 순환, 다량의 순환물질 사용 등 여러 가지 현실적 문제들을 안고 있지만, 이들 중 일부 사이클은 수소생산을 위한 응용 가능성이 매우 높은 것으로 여겨지고 있다.

4. 국내의 연구동향

고집광 태양에너지에 기초한 국내의 관련 연구는 최근 한국에너지기술연구원(KIER)에서 개발을 완료한 dish 형 집광시스템을 중심으로 소규모 발전(혹은 복합발전)을 행하는 수준에 머물고 있다. 초고온 태양열의 이용을 고려한 수소제조 및 석탄 가스화 등에 관한 실험적 연구는 일부 수행된 바 있으나 실제 집광시스템에 적용하여 반응을 수행한 예는 현재까지 없다.

국외의 경우 고집광 태양에너지를 이용한 초고온 열화학반응 응용분야는 선진국들을 중심으로 크게 주목받고 있으며 관련기술의 개발에 관한 노력이 세계 각국에서 급속히 활성화 되고 있다. 이와 관련하여 현재 진행되고 있는 대표적인 연구개발 프로그램으로 IEA의 SolarPACES(Solar

Power and Chemical Reaction Systems)프로그램을 들 수 있다. 유럽연합과 12개국이 함께 참여하고 있는 이 프로그램은 태양열 발전, 태양열 열화학 반응, 기술응용 등의 3개 분야(Task)별로 나누어 연구를 진행하고 있으며, 특별히 태양열 열화학반응 관련분야의 경우(Task 2), 태양에너지를 화학에너지의 형태로 변환하여, 저장 및 수송이 가능한 에너지를 생산하는 것을 주된 목표로 하고 있다. 이 분야의 최근 연구경향은 수소와 같은 태양연료의 생산을 위한 기술개발에 보다 집중하여 노력을 기울이고 있으며 주요 선진국들도 이와 관련된 다양한 장단기 전망과 계획을 수립하고 연구에 박차를 가하고 있다.

5. 결론

다각적이고 실질적인 신재생에너지의 효과적 활용을 위하여 새로운 분야에 관한 과감한 선행 연구개발과 투자가 필요함은 분명해 보인다. 구체적으로는 미래의 수소사회에 대비키 위한 친환경적이고도 효율적인 수소생산기술의 확립이 절실히 요구된다 하겠다. 신재생에너지를 고려한 기존의 수소생산 및 이용의 접근 방법인 '전기생산 -> 전기를 이용한 물분해 수소생산 -> 수소를 이용한 전기의 재생산' 경로는 태양에너지의 경우 효율적인 방법이 될 수 없다. 따라서 태양에너지를 이용하는 수소생산 기술은 초고온 태양열 화학반응에 기초한 태양연료의 생산이 유력하다고 할 수 있다. 이를 위해서는 장·단기적 전략의 확립과 이에 따른 기술개발이 필요하며 단기적(5-10년)으로는 화석연료에 기반을 둔 태양에너지 수소생산 기술이, 장기적(20-30년)으로는 물과 같은 비탄소 수소를 이용한 수소생산기술이 상용화 되어야 한다.

References

- [1] Steinfeld, "Solar Thermochemical Production of Hydrogen-a Review", Solar Energy, in press.
- [2] Kodama, 2003. "High-Temperature Solar Chemistry for Converting Solar Heat to Chemical Fuels", Progress in Energy and Combustion Science vol. 29, pp.567-579.
- [3] Brown, Funk and Showalter, 2000. Initial Screening of Thermochemical Water- Splitting Cycles for High Efficiency Generation of Hydrogen Fuels Using Nuclear Power, GA-A23373, Sandia Nat. Lab.