

원자력 이용 고체산화물 고온전기분해 수소 및 합성가스 생산시스템의 열역학적 효율 분석 연구

윤덕주^{*}, 고재화^{*}

*전력연구원

A Study on Thermodynamic Efficiency for HTSE Hydrogen and Synthesis Gas Production System using Nuclear Plant

DUKJOO YOON^{*}, JAEHWA KOH^{*}

*KEPRI, 65 Munji-Ro, Yuseong-Gu, Daejeon, 305-380, Korea

ABSTRACT

High-temperature steam electrolysis (HTSE) using solid oxide cell is a challenging method for highly efficient large-scale hydrogen production as a reversible process of solid oxide fuel cell (SOFC). The overall efficiency of the HTSE hydrogen and synthesis gas production system was analyzed thermo-electrochemically. A thermo-electrochemical model for the hydrogen and synthesis gas production system with solid oxide electrolysis cell (SOEC) and very high temperature gas-cooled reactor (VHTR) was established. Sensitivity analyses with regard to the system were performed to investigate the quantitative effects of key parameters on the overall efficiency of the production system. The overall efficiency with SOEC and VHTR was expected to reach a maximum of 58% for the hydrogen production system and to 62% for synthesis gas production system by improving electrical efficiency, steam utilization rate, waste heat recovery rate, electrolysis efficiency, and thermal efficiency. Therefore, overall efficiency of the synthesis production system has higher efficiency than that of the hydrogen production system.

KEY WORDS : Hydrogen production efficiency(수소생산효율), SOEC(고체산화물전해셀), VHTR(초고온가스로), Synthesis gas(합성가스), HTSE(고온전기분해)

Nomenclature

H_{HHV} : high energy value of hydrogen

H_{RE} : reversible energy

η_{el} : generation efficiency

η_{TH} : heat production efficiency

η_{es} : electrolysis efficiency

H_{TH} : thermal energy

[†]Corresponding author : djyoon@kepri.re.kr

[접수일 : 2009.9.17 수정일 : 2009.10.15 게재확정일 : 2009.10.23]

1. 서 론

수소는 미래의 근본적인 동력원으로서, 그리고 무한 청정에너지로서 화석연료 체제하의 에너지 고갈위기와 탄산가스로 인한 환경문제에 대처할 수 있는 유일무이한 대안인 것이다. 또한 청정 재생에너지원을 이용해야한다는 요구는 급격히 증대되고 있는 지금 태양에너지와 풍력에너지는 가장 풍부한 재생에너지원으로서 화석연료를 부분적으로 대체하고 있다. 그러나 태양과 풍력에너지는 이용에 있어서 시간적, 공간적으로 제약되고 비용이 너무 높다는 점에서 대체 미래에너지로서의 한계성을 지닌다. 반면에 수소는 이러한 단점을 보완할 수 있는 에너지로서 여러 가지 수소생산 방법으로 제조되고 있다. 그 중에서 수전해는 재생에너지 혹은 원자력과 결부 된다면 탄소를 배출하지 않고서 수소를 생산할 수 있는 확립된 기술이다. 그러나 수전해는 높은 전기소모와 설비비용으로 인한 경제성 문제로 상업화에 이르지 못하고 있다. 고온증기전해는 상온에 비해 고온에서 프리깃스에너지가 적게 소모되므로 인해 전기를 적게 소모한다. 이러한 고온 증기전해 수소생산방법은 고체산화물형 전해전지를 이용하여 확립되고 있다. 이것은 고온의 증기가 수소와 산소로 분리된다는 측면에서 고체산화물형 연료전지의 역방향운전이며 연료전지 분야에서 개발된 최신기술을 그대로 적용할 수 있다. 전해 및 전지의 순차적 운전방법은 잉여에너지를 저장하는 충전지와 같은 기능을 한다. 그래서 이러한 전해 및 전지의 교차 운전은 전기에너지의 공급과 수요사이에서 오는 시차적 불균형 문제를 해결할 수 있을 것이다¹⁻⁶⁾.

한걸음 더 나아가 이 같은 고체산화물 고온증기 전해기술은 수소뿐 만아니라 액체연료를 생산할 수 있는 기술로서 고온의 증기와 이산화탄소로부터 합성가스의 원료인 수소와 일산화탄소를 생산할 수 있는 기술로서도 활용 할 수 있다⁷⁾. 합성가스는 이미 개발이 완료된 상용 화학공정을 거쳐 합성액체 연료로 제조된다. 합성액체연료(메탄올)는 우주항공 등 여러 분야에서 고농축 연료로 이용되고 있으

며 수소가 저장, 이송 등에 고도의 기술과 투자를 요구하는 데 비해 액체연료는 이러한 문제를 극복할 수 있다.

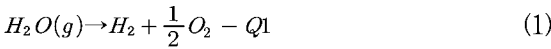
이와 같이 고체산화물형 연료전지기술은 탄산가스를 배출하지 않으면서 수소를 생산할 수 있는 미래기술로서 각광을 받고 있으며 현재 수소 생산효율을 높이기 위하여 다양한 셀 물질 개발과 운전방법 개발에 연구를 하고 있다. 본 논문은 1000℃에서 운전되는 초고온가스로와 300℃에서 운전되는 가압경수로 원전을 이용하는 수소 및 합성가스 생산시스템에 관한 열적 생산 효율을 향상시킬 수 있는 방안을 제시하기위해 민감도 분석을 수행하였다.

2. 고온증기전해 수소생산시스템

고온(700~850℃)의 이산화탄소와 증기가 전해조로 공급되면 이들은 전자의 힘에 의해 수소, 일산화탄소 및 산소이온으로 분리되며 그중 산소는 전자와 결합하여 이온으로 되고 그 이온은 전해질을 통과하여 양극으로 이동한 후 전자를 잃고서 산소로 변환되어 배출된다⁸⁾. 이와 같이 고온증기를 이용하여 전해를 수행하는 것은 전극이 활성화 되어 음극과 양극의 초과 전압을 낮추고 전류밀도를 높일 수 있어 분극 손실을 줄임으로서 프로세스 효율을 증대시키기 위한 것이다. 고온 증기전해 셀은 세라믹으로 제조함으로써 고온 내식성을 향상시킨다⁹⁾. 최적의 효율을 구현하기위해 전극, 전해질 및 셀의 구조물은 운전온도에 따라 전도도, 열팽창율, 화학적 안정성 등을 고려하여 특성에 맞는 재료를 결정된 후 운전변수를 선택하여 운전한다¹⁰⁾. 특히 고효율의 고온 발전시스템과 결합할 경우 고온 증기전해 프로세스는 수소생산 효율을 극대화 할 수 있으므로 기존의 가압경수로(PWR) 뿐만 아니라 초임계압수냉각로(SCWR) 및 초고온가스로(VHTR)와 같은 고효율의 고온 원자로의 공정열을 이용할 수 있다¹¹⁾.

3. 수소생산시스템의 열적-화학적 모델

전해조에서 증기와 이산화탄소가 환원이 일어나 수소와 일산화탄소로 분리되는 과정은 아래와 같으며 이러한 프로세스가 일어나기 위해서는 흡열반응이므로 전기 에너지와 열에너지가 필요하다.



전해조에서 합성가스(수소 및 일산화탄소) 열적 생산효율(ϕ)은 다음과 같이 정의된다. 즉 생산된 수소 및 일산화탄소의 물질의 고발열량을 합성가스 생산에 소모되는 총에너지로 나눈 값이다. 여기서 총에너지는 효율을 고려한 전기에너지의 양과 효율을 고려한 열에너지의 합에서 배출되는 가스의 폐열에서 회수되는 에너지를 차감한 값으로 다음과 같은 수식으로 표현할 수 있다.

$$\phi = \frac{H_{HHV}}{H_{RE}/\eta_{el}\eta_{es} + H_{TH}/\eta_{th}\eta_{Steam\ Utilization} - H_{waste}\eta_{recovery}} \quad (3)$$

여기서, H_{HHV} = 수소 및 일산화탄소의 고에너지 발열량, H_{RE} = 가역 에너지 = H_{el} , η_{el} = 발전 효율 (33~52%), $\eta_{es} = E_{REV} / (E_{REV} + E_{act} + E_{ahm} + E_{conc})$ = 전기분해 효율(60~90%), H_{TH} = 온도 변화에 의해 생기는 엔트로피 변화의 열에너지(T Δ S), η_{TH} = 열 생산 효율(60~90%), $\eta_{Steam\ Utilization}$ = 증기분해 시 증기 이용율(60~90%), H_{waste} = 전기분해시 손실되는 열량 = $H_{RE}/\eta_{es}(1-\eta_{es}) + H_{TH}/\eta_{Steam\ Utilization}(1-\eta_{Steam\ Utilization})$, $\eta_{Recovery}$ = 배출되는 가스의 폐열 중 회수율(60~90%)이다.

4. 결과 및 토론

4.1 전기분해 효율

증기를 전기분해하기 위해서는 이론적으로는 1.23V

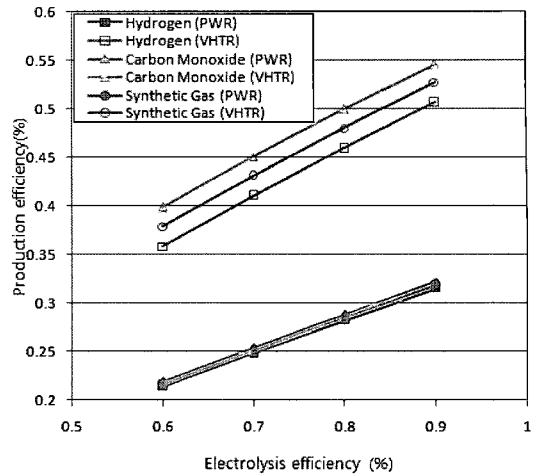


Fig. 1 Hydrogen and synthesis gas production efficiency in various electrolysis efficiency of the HTSE coupled with PWR and VHTR.

만 있으면 된다¹²⁾. 그러나 실제 전기분해에서는 고체 전해질을 통과하기 위해서는 저항이 있게 마련이다. 전해질의 저항이 R이라면 iR의 전압이 더 필요로 하며 또한 생성된 수소나 산소가 전극 표면에 층을 형성하여 저항을 만든다. 이러한 분극저항에 의해 형성되는 과전압을 고려해야 한다. 따라서 비가역적 저항에 의해 생기는 전압을 고려하여 실제로 소모되는 전압에 비해 이론적 전압의 비율에 따라 전기분해효율이 결정된다. 이는 셀을 어떤 물질로 어떻게 제조하느냐 혹은 운전변수를 어떻게 조절하느냐에 따라 효율이 결정되나 대체로 60%~90%에서 유지할 수 있다. Fig. 1과 같이 분석결과에 따른 전기분해효율은 VHTR의 경우 수소생산효율, 일산화탄소 생산효율, 합성가스 생산효율에 미치는 영향은 대체적으로 전기분해효율이 60%에서 90%까지 증가시킬 경우 생산효율은 13% 가량 증가한다. PWR의 경우 생산효율이 21%에서 32%로 증가한다. 여기서 수소생산효율에 비해 일산화탄소 생산효율이 더 높으며 합성가스 생산효율은 그 중간의 평균값이라는 것을 알 수 있다. 수소와 합성가스의 생산효율 차이는 PWR의 경우 거의 없으며 VHTR의 경우 4% 정도 차이로 일산화탄소 생산효율이 더 높음을 알 수 있다.

4.2 열효율

열효율은 열을 생산하기 위해서 소요되는 에너지원의 열량과 전기분해에서 필요로 하는 온도까지 상승하기위해 필요로 하는 열량의 비율이다. 이는 중간 열교환기 등을 거쳐 전해조로 열이 전달된다는 측면에서 시스템에 대한 접근이 필요하다. 또한 고체산화물 고온 전해조가 세라믹으로 제조되기 때문에 고압으로 운전하기 어려운 점이 있어 고온가스로 70기압의 운전압력은 중간열교환기를 사용하여 대기압까지 강하시킬 필요가 있다. 따라서 열교환기 튜브는 고 차압으로 설계 되려면 재료 및

제조측면의 문제가 뒤따른다. 그래서 열교환기를 2중으로 설계해야하는 시스템적 고려가 필요하다 (Fig. 3). 이럴 경우 여러 단계를 거치면서 열손실도 커지게 되고 열 이용 효율도 낮아지게 되는 어려움이 뒤따른다.

Fig. 2와 같이 열효율의 변화에 따른 수소 및 합성가스 생산효율을 비교한 결과 열효율이 60%에서 90%로 변화더라도 전체 수소생산효율에 미치는 영향은 5% 가량밖에 되지 않는다. 이는 수소 및 합성가스 생산효율 계산에서 전체 열량 중에서 전기가 차지하는 비중이 VHTR의 경우 80~90%이고 PWR의 경우에도 95%이상인 점을 감안하면 이러한 결과는 당연하다고 하겠다.

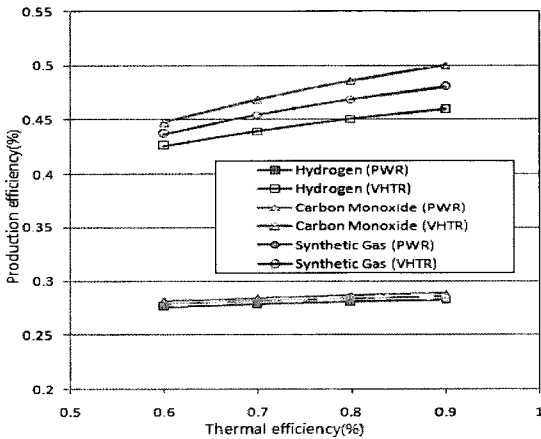


Fig. 2 Hydrogen and synthesis gas production efficiency in various thermal efficiency of the HTSE coupled with PWR and VHTR.

4.3 발전효율

발전소에서 전력생산시스템은 두 가지 사이클이 있다. 랭킨(Rankine)사이클과 브레이튼(Brayton) 사이클이다. 랭킨사이클은 현재의 대부분의 석탄 및 원자력발전소에서 채택하고 있는 사이클로서 증기를 유체로 사용함으로써 이송하는데 동력이 가스에 비해 적게 소모되어 상대적으로 높은 효율을 유지할 수 있다. 또한 재열 및 재생 사이클을 채택하여 효율을 높이고 있다. 브레이튼 사이클은 아직 원자력발전소에 채택되고 있지 않으나 많은 연구가 진행되고 있다. 이러한 헬륨을 작동유체로 하는 브레이튼 사이클은 원자력발전소와 연결할 경우 안정적인 루프를 형성하는 것으로 알려져 있다. 원자력발전소의 냉각재를 바로 터빈의 작동유체로

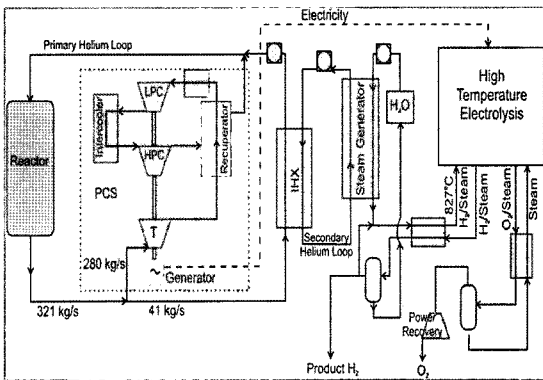


Fig. 3 Concept outline for HTSE-based hydrogen production system (GA)^{11,13)}.

Table 1 Electricity generation efficiency of Nuclear power plants in various temperature¹⁰⁾

Temperature	Efficiency (%)	Type of nuclear plants
300°C	33	PWR
500°C	40	SCWR, SFR
600°C	42	LFR
700°C	45	MSR
800°C	47	GFR, LFR, MSR, HTGR
900°C	50	HTGR
1000°C	52	VHTR

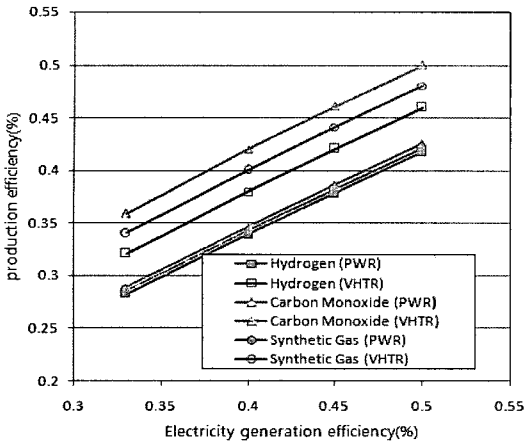


Fig. 4 Hydrogen and synthesis gas production efficiency in various electricity generation efficiency of the HTSE coupled with PWR and VHTR.

사용하는 직접식과 중간에 열교환기를 거쳐 원자로 일차 측과 작동유체를 분리하는 간접식이 있다. 직접식이 효율은 높으나 안정성이 떨어지는 약점이 있다. 또한 이러한 사이클은 재생사이클과 중간 냉각기를 채택하여 폐열을 이용함으로써 효율을 높인다. 재생사이클은 터빈을 나가는 고온의 가스를 이용해 열교환기로 유입되는 가스를 예열하는 방식으로 이루어져 있다. 열적효율 분석결과에 따르면 최대효율은 압축기와 터빈의 각단의 압력비가 동일하게 유지될 때 이루어지는 것으로 나타났다. 즉, 재생사이클에서 각단의 압력비를 낮게 유지하여 여러 단으로 압축기를 설계할 경우 높은 효율을 낼 수 있는 것으로 나타났다¹⁴⁾.

Fig. 4에서 보는 바와 같이 발전효율이 33%에서 50%까지 변하는 동안 VHTR의 경우 34%에서 48%까지 상승하였으며 PWR의 경우 28%에서 42%로 상승하였다. 발전소 발전효율은 온도에 민감하게 변하며 온도는 재료 문제 등으로 인하여 쉽게 올릴 수 없다는 측면에서 전기효율 향상으로 수소 및 합성가스 총괄생산효율을 향상시킬 수 있는 여지는 많지가 않다.

4.4 증기 이용률

전해조로 공급되는 증기가 전부 수소와 산소로

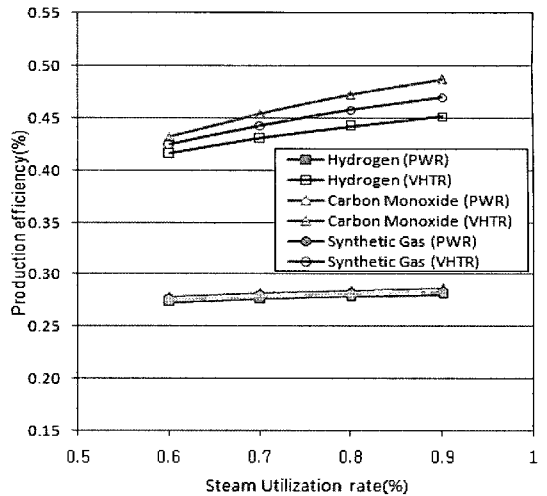


Fig. 5 Hydrogen and synthesis gas production efficiency in various steam utilization rate of the HTSE coupled with PWR and VHTR.

변환되기는 어렵다. 증기가 균일하게 배분되고 전해조 전극표면에 접촉이 잘 되어 반응이 많이 일어난다면 증기가 반응하지 않고 배출 되는 증기의 양은 줄어들 것이다. 이와 같이 공급되는 증기 중에서 반응에 참여하는 비율을 증기 이용률이라 정의한다. 증기 이용률이 낮아지면 그만큼 폐열이 많아진다는 것을 의미한다. Fig. 5에서 보는 바와 같이 증기 이용률이 높아짐에 따라 5%의 전체 수소 및 합성가스 생산 총괄효율이 상승함을 알 수 있다. 이는 전해조 제조 시 유량이 균등하게 분포하도록 설계하고 전해조 내부에서 증기가 전극표면에 잘 접촉 되도록 설계되어야 하며 또한 최적 증기유량으로 운전하여 증기가 전해반응 없이 그냥 배출하지 않도록 운전함으로써 이루어진다.

4.5 폐열 회수율

Fig. 6에서 보는 바와 같이 전해조 수소생산 시스템에서 그냥 버려지는 열을 회수함으로써 전체 수소생산효율에 미치는 영향은 2.5% 가량 효율 상승을 가져온다. 열회수 시스템은 가스 출구 부위에 열을 재생하기 위한 열교환기를 설치하여 유입되는 증기 혹은 수소를 통과시켜 예열하는 구조로 이뤄

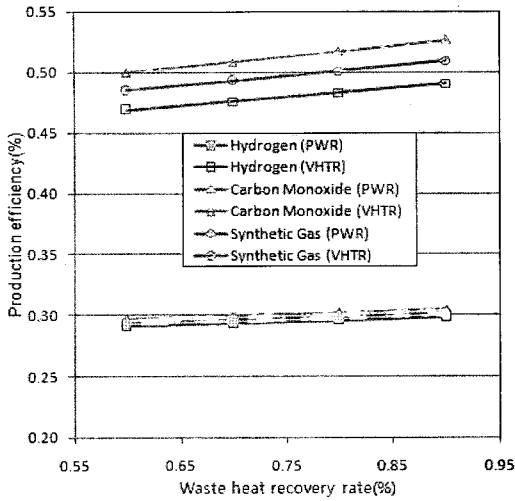


Fig. 6 Hydrogen and synthesis gas production efficiency in various waste heat recovery rate of the HTSE coupled with PWR and VHTR.

진다. 이러한 시스템은 설치비가 요구되지만 열효율 향상 측면에서 시스템 최적화를 할 의미가 있다. 폐열회수 시스템은 생산시스템의 총괄 열효율 향상에 미치는 영향이 적음에도 불구하고 다른 분야에 비해 기술적 어려움은 없다고 할 수 있다.

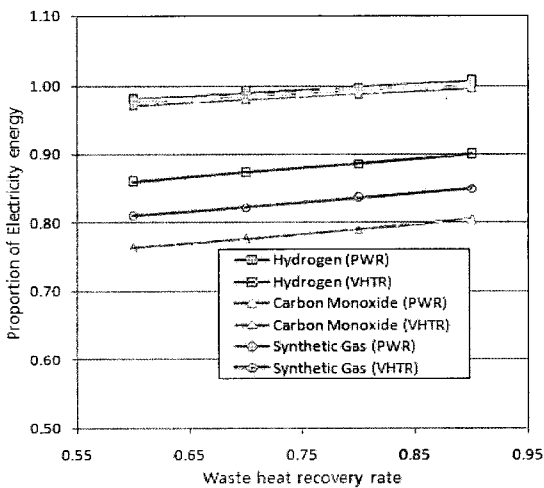


Fig. 7 Proportion of electricity energy in total energy of the HTSE coupled with PWR and VHTR; Incase of PWR, it was assumed that the electricity as the heat to escalate the temperature of inlet gases from 300°C to 1000°C was used.

4.6 전기에너지 비율

전체 에너지 중 전기에너지가 차지하는 비율은 Fig. 7에서 보는 바와 같이 80~95%에 이른다. 이것은 전기분해효율과 전력생산효율이 전체효율에 미치는 영향이 높게 나타나는 원인이 된다.

4.7 분석결과 종합토론

발전효율을 제외한 여러 효율인자들을 향상시킬

Table 2 Effects of the parameter on the hydrogen and synthesis gas production efficiency in VHTR

Parameter (range)	Effects of the parameter on the production efficiency in VHTR
Electrolysis efficiency (60-90%)	13 percentage of the production efficiency increases when the electrolysis efficiency is improved through material and design of cell stack.
Thermal efficiency (60-90%)	5 percentage of the production efficiency increases when the thermal efficiency is improved through thermal production system.
Generation efficiency (33-50%)	14 percentage of the production efficiency increases when the generation efficiency is improved. However it is very difficult to improve generation efficiency with low cost because of high temperature material and maintenance cost.
Steam Utilization (60-90%)	4 percentage of the production efficiency increases when the steam utilization rate is improved through optimization of operating parameter and design of cell stack.
Waste heat recovery (60-90%)	2.5 percentage of the production efficiency increases when the electrolysis efficiency is improved through the addition of a waste heat recovery system.

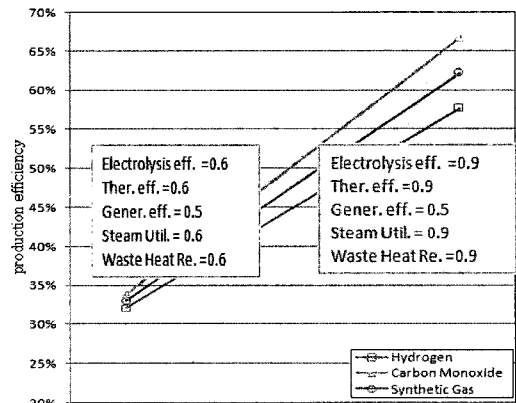


Fig. 8 Comprehensive effects of parameters on the production efficiency in the HTSE coupled with VHTR.

Table 3 The reversible oxidation of hydrogen and carbon monoxide in the HTSE (from ideal gas properties)

Energy	Hydrogen		Carbon Monoxide	
	PWR (300℃)	VHTR (1000℃)	PWR (300℃)	VHTR (1000℃)
Total Energy (kJ/mol)	241.82	241.82	282.99	282.99
Hel (kJ/mol) Electricity Energy	215.3	177.4	244.55	172.98
Hth (kJ/mol) Thermal Energy	36.52	74.42	48.44	120.01

경우 Fig. 8에서 나타낸 바와 같이 수소생산효율이 34%에서 58%까지 향상되고 합성가스 생산효율이 34%에서 62%까지 향상되는 것을 알 수 있다. 합성가스 생산효율이 더 높아지는 것은 Table 3에서 나타낸 바와 같이 수소에 비해 일산화탄소의 비가역적에너지 대비 열적 에너지 비중이 더 높기 때문이다. 따라서 총괄생산효율을 고려할 때 수소만 생산하는 것에 비해 일산화탄소를 동시에 생산하여 합성가스를 생산함으로써 생산효율도 높아지고 에너지 이용성 측면에서 액체연료로 사용할 수 있으므로 수소의 운송 및 저장의 어려움을 피해갈 수 있다. 또한 이러한 고체산화물형 고온증기전해기술은 이산화탄소의 자원화라는 측면에서 지구온난화에 대비할 수 있는 기술로서 각광을 받을 수 있으며 향후 전기와 수소와 합성액체연료를 한곳에서 생산하는 에너지 종합 파크 건설에 핵심적인 기술로 자리매김 할 수 있을 것이다.

5. 결 론

고온전기분해 기술을 이용하여 수소 및 액체연료를 제조하는 과정의 열적 효율을 분석한 결과 기존 경수로 원전 및 초고온가스로서 수소 및 합성가스 생산총괄효율에 미치는 영향은 발전효율이 가장 크며 그 다음으로 전기분해 효율, 열효율, 증기이용율, 폐열회수율 순으로 영향을 가져온다.

이러한 효율 향상에 있어서 발전효율은 발전소의 운전온도를 높임으로서 이루어지는 것으로 이

는 재료 문제 및 운전 유지보수 문제를 야기할 뿐만 아니라 고비용을 수반하는 건설비용과 연결된다. 따라서 효율 향상에 가장 많은 영향을 미치는 발전효율을 제외할 때 그 다음으로 가장 많은 영향을 미치는 것으로는 전기분해효율이다. 이는 전해조 구조설계, 전해조 셀 물질 개발, 운전 최적화 등으로 이루어질 수 있는 것으로서 향후 이러한 셀 물질개발 분야에 많은 연구가 이루어져 효율 향상과 경제성 확보에 한 걸음 더 나아 갈 수 있게 해야 할 것이다. 그 다음으로는 열효율, 증기 이용율 및 폐열 회수 시스템 구축을 통해 효율을 향상시킬 수 있는데 최적 열전달 시스템 구축, 증기 이용율 향상을 위한 운전 최적화 및 셀 구조 개발 등을 통해 이룩할 수 있다.

수전해 수소생산시스템 총괄효율은 발전효율 33%, 전기분해 67% 효율을 가정할 경우 21% 수준의 효율을 보인다.

그러나 초고온가스로서와 연결된 고온전기분해 수소생산시스템 총괄효율은 33%에서 여러 효율변수를 통해 효율향상을 꾀한 결과 58%까지 향상시킬 수 있었다. 같은 시스템에서 합성가스는 62%까지 효율 향상이 가능했다. 이는 수소생산만 하는 것보다도 일산화탄소를 포함하는 합성가스를 제조함으로써 더 많은 효율향상을 유도 할 수 있다는 것을 나타낸다는 데 의미가 있다.

참 고 문 헌

- 1) W. Doenitz and R. Schmidberger, Concepts and design for scaling up high-temperature water vapor electrolysis, Int. J. Hydrogen Energy 7, 1982, pp. 321-330.
- 2) Duk-Joo Yoon, Jae-Hwa Koh, A Study on methodology for efficiency, operation and control for the hydrogen and electricity production system using nuclear plant, Korea energy engineering society, 2008, 10.15, Busun Bexco.
- 3) R. Hino, Katsuhiko Haga, Hideki Aita and Kenji Sekita, R&D on hydrogen production by high-

- temperature electrolysis of steam, Nuclear Engineering and Design, 2004, pp. 363-375.
- 4) S. Hashimoto, et. al., A Study of steam electrolysis using a microtubular ceramic reactor, international journal of hydrogen energy, 34, 2009, pp. 1159-1165.
 - 5) Xiongwen Zhang, Jun Li, Guojun Li and Zhenping Feng, Cycle analysis of an integrated solid oxide fuel cell and recuperative gas turbine with an air reheating system, Journal of Power Sources Volume 164, Issue 2, 10 February 2007, pp. 752-760.
 - 6) Y. Shin, W. Park, J. Chang, J. Park, Evaluation of the high temperature electrolysis of steam to produce hydrogen Int. J. Hydrogen Energy 32, 2007, pp. 1486-1491.
 - 7) Sune Dalgaard Ebbesen, Mogens Mogensen, Electrolysis of carbon dioxide in Solid Oxide Electrolysis Cells, Journal of Power Sources 193, 2009, pp. 349-358.
 - 8) Sune Dalgaard Ebbesen, et. al., Electrolysis of carbon dioxide in Solid Oxide Electrolysis Cells, Journal of Power Sources 193, 2009, pp. 349-358.
 - 9) J. Stephen Herring, James E.O'Brien, Carl M.Stoots, and G.L.Hawkes, Progress in high-temperature electrolysis for hydrogen production using planar SOFC technology, International Journal of Hydrogen energy 32, 2007, pp. 440-450.
 - 10) Liu Mingyi, et. al., Thermodynamic analysis of the efficiency of high-temperature steam electrolysis system for hydrogen production, Journal of Power Sources 177, 2008, pp. 493-499.
 - 11) Rachael Elder, Ray Allen, Nuclear heat for hydrogen production : Coupling a very high/high temperature reactor to a hydrogen production plant, Progress in Nuclear Energy 51, 2009, pp. 500-525.
 - 12) J. W. Kim, et. al., Hydrogen Energy, A-JIN Press, Feb. 2005.
 - 13) Richards, M., Shenoy, A.S., Venneri, F., Brown, L., Fukuie, M., arvego, E., 2006. Modular helium reactor deployment for flexible energy demands, In HTR2006 3rd International Topical Meeting on High Temperature Reactor Technology, Johannesburg, South Africa.
 - 14) Herranz, L., Linares, J., Moratilla, B., 2007. Assessment of regenerative reheating in direct brayton power cycles for high-temperature gas-cooled reactors. Nuclear Technology 159, pp. 15-24.