

원자료를 이용한 수소생산

서 중 석* 한양대학교 원자시스템공학부 겸임교수 e-mail:jssuh42@hanyang.ac.kr

역자 註: 요즘 우리는 수소경제라는 단어를 자주 듣는다. 수소경제란 수소가 석탄이나 석유와 같은 화석연료를 대체하여 우리 생활의 주 에너지원 역할을 하는 시대를 말한다. 이러한 수소경제를 구현하기 위하여는 경제성 있는 수소생산이 뒷받침 되어야 한다. 지금은 물 전기분해나 천연가스로부터 수소를 얻고 있으나 낮은 효율 때문에 경제성이 없다. 한국을 비롯하여 세계 여러 나라가 원자료에서 나오는 고열을 이용하여 수소를 생산하는 기술개발에 박차를 가하고 있다. 이와 관련해서 Nuclear Engineering(2005년 7월)에 게재 되었던 내용을 번역하여 소개한다

우리는 지금 현재의 수송체제를 석유로부터 수소에 기반을 둔 수송체제로 전환하는데 많은 관심을 가지고 있다. 수소경제 시대가 도래하면 오염물질과 온실가스 배출이 감소하고 우리의 석유수입에 대한 의존도가 줄어들 것이다. 수소는 화석연료를 대체할 수 있는 잠재력을 가진 환경 친화적인 연료이지만, 수소는 에너지 운반체이지 에너지원은 아니다. 수소는 지구상에서 가장 풍부한 원소이지만 모두 물, 탄화수소 또는 탄수화물에서처럼 다른 원소와 화학적으로 결합된 형태로 존재한다. 이들 복합체로부터 수소를 분리해 내기 위해서는 에너지를 투입해야 한다

현재 수소는 주로 증기개조법에 의해 메탄가스로부터 생산하고 있으며 비료생산, 정유, 청정연료 제조 및 기타 공업용으로 사용되고 있다. 세계의 연간 수소 생산량은 약 4000만 톤 이다. 이중에서 미국이 연 1000만 톤을 생산하고 있는데 이



한양대학교 원자시스템공학부 겸임교수 1942년 9월 18일 생
서울대학교 원자력공학과 졸업 미국 뉴욕공대 대학원 원자력공학과 석사
미국 펜실베니아대학 공학박사 한국전력 기술기획처장, 대한전기협회 전무이사,
한국원자력산업회의 사무총장 역임

는 48GWt 열에너지에 해당한다. 이만한 량의 수소 생산에 미국의 총 천연가스 사용량의 5%가 소모되고 연 1,000만톤의 CO₂ 가스가 방출된다.

수송에너지를 수소로 대체하기 위해서는 수소생산량을 현재보다 18배 이상 늘려야 한다. 따라서 수소경제로의 전환을 위해서는 분명히 새로운 수소원이 필요하다. 원자력을 사용하여 물로부터 수소를 생산하면 화석연료 사용이나 온실가스 배출 없이 새로운 수소를 확보할 수 있다

원자력을 이용한 수소생산에는 여러 가지 방법이 있다. 한가지 방법은 원자력발전으로 생산한 전기로 물을 전기분해 하여 수소와 산소로 분리한다. 이러한 저온 전기분해는 입증된 상용기술이다. 이 공정의 순효율은 원자력발전 효율에 전기분해 셀의 효율을 곱한 값이다. 가압경수로의 발전효율이 약 32%이고 셀의 효율은 75%이므로 저온 전기분해 공정의 순효율은 약 24%이다. 다른 방법은 원자력발전소의 전기 대신에 원자로의 고온증기를 직접 사용하여 수소를 분리하는 것이다. 이 경우 약 50% 정도의 열-수소 전환 효율을 얻을 수 있다.

I. 저온 전기분해

재래식 또는 저온 전기분해는 충분히 입증된 상용 기술이다. 현재 미국이 공급하는 수소의 약 4%가 이 기술에 의해 생산되고 있다. 이들 저온 전기분해 장치를 제작·공급하는 주요 회사는 대략 5개 정도가 있으며 이들 회사는 수성 수산화칼륨 용액(알카리성 전기분해)을 사용하는 단극 또는 양극셀, 그리고 양자교환막셀(PEM 전기분해)의 세가지 서로 다른 전기분해 방법을 사용하여 수소를 생산하고 있다. 대량 수소생산에는 알카리성 기술이 사용된다. 이들 전기분해 장치의 유니트 용량은 2MWe (수소 일일 생산

량 1,000kg)이며 유니트 여러 개를 병렬로 연결하여 큰 용량을 얻는다. 대 용량의 유니트는 보통 대기압에서 수소를 생산하여 배관 내에서 20 내지 30 기압으로 가압한다

저온 전기분해 계통의 수소생산 최고 효율, 즉 사용전력에 대한 생산된 수소의 열 에너지 비율은 75% 정도이다. 만일 열효율이 32%인 경수로 원전의 전기를 사용한다면 저온전기분해는 24% 효율로 수소를 생산하는 셈이 된다. 저온 전기분해는 열을 전기로, 그리고 전기를 수소로 변환하는 2단계 공정을 거치기 때문에 효율 감소와 투자비 증가라는 불이익을 감수해야 한다.

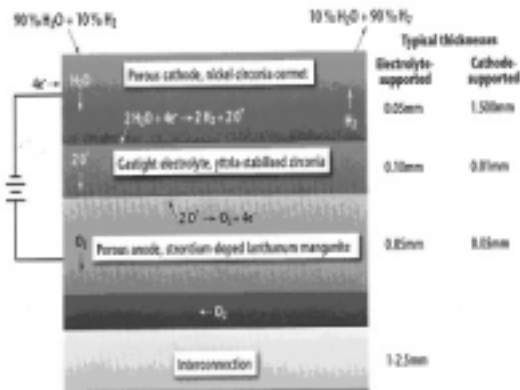
원자력 전기를 사용하여 저온 전기분해에 의하여 생산하는 수소 단가는 대략 \$4~6/kg이다. 이 생산비는 규모가 작기는 하지만 천연가스로부터의 수소생산비 \$1.00~1.50/kg과 경쟁이 되지 않는다

예를 들어 발전을 하지 않는 동안에는 물을 방류하는 수력발전소가 있다면 이 발전소를 저온전기분해에 이용할 수 있다. 저온 전기분해는 신속한 기동, 정지가 가능하므로 수력발전소가 전력망에 전기를 공급하지 않는 동안에는 발전한 전기로 수소를 생산하여 저장하면 된다. 이러한 방식은 원자력에도 적용이 가능하나 이를 위해서는 충분한 여유용량이 있어야 한다. 전력회사들은 원자력과 발전 원가가 낮은 발전소를 사용하여 기저부하를 공급하고 첨두부하는 화석연료 발전을 투입하여 감당하고 있다. 이들 화석연료 발전소들은 연료비가 높기 때문에 전기생산이 필요하지 않을 때는 정지 시킨다. 만일 전력회사들이 원자력발전소를 필요 이상으로 많이 건설하여 전력 수요가 낮은 시간에 남는 전기를 수소생산에 사용할 수 있다면 저온 전기분해는 대량 수소생산의 역할을 담당할 수 있을 것이다

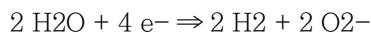
II. 고온 전기분해

고온 전기분해는 그림1과 같이 온도가 섭씨 800oC인 증기를 전해질에서 분해시켜 두 전극에서 수소와 산소를 발생 시킨다.

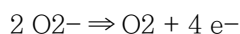
1 |



고온 증기가 평판셀의 한쪽 가장자리에 유입하면 이 증기는 음극(cathode)과 전해질의 경계면으로 확산되어 다음과 같은 반응에 의하여 수소와 산소 이온으로 분리된다



산소 이온은 전압에 의하여 고체 전해질을 통과하여 전해질(electrolyte) - 양극(anode) 경계면에서 다음 반응에 의하여 전자를 내놓고 산소로 환원된다



이들 셀은 연결판(interconnect plate)에 의하여 필요한 수만큼 중첩해서 연결된다. 10개 셀을 연결하여 2004년 10월 및 2005년 1월에 시행한 실험에서 시간 당 60 리터 이상의 수소를 생산 하였다. 800-

1000 oC에서는 전해질 내에서의 산소 운동에 대한 저항이 훨씬 낮아지고 에너지의 약 30%가 전기대신 열로 공급되기 때문에 수소생산에 소요되는 전력량이 감소한다. 고온 원자로의 발전 효율이 약 45%이기 때문에 고온전기분해를 이용한 수소생산 효율은 45-50% 정도가 된다

증기의 고체산화물 전기분해 기술개발 및 용량확대를 위한 연구가 미국 Idaho 국립연구소에서 진행 중 이다. 연구는 전기분해 셀과 스택의 성능특성 도출을 위한 실험프로그램을 포함하고 있다. 단위 셀 실험에서 이론치에 근접하는 성능 확보에 성공함으로써 소규모이지만 효율적인 수소생산의 가능성을 증명하였다. 이러한 예비 실험결과에 비추어 볼 때 원자력 에너지를 사용하는 고온전기분해는 가까운 장래에 주요 수소생산 수단이 될 수 있을 것으로 전망된다.

III. 열화학 수-분리

(Thermochemical Water-Splitting)

열화학적 수-분리는 일련의 열구동 화학반응에 의하여 물을 수소와 산소로 변환 시킨다. 에너지는 고온 흡열 화학반응을 통하여 열로서 열화학 사이클에 입력되며 이 열은 저온 발열반응에서 방출된다. 물을 제외한 모든 반응물은 재생 및 재순환 된다

1. 유황-요오드 사이클 (Sulphur-Iodine Cycle)

그림 2에 나타낸 유황-요오드 사이클에서는 요오드와 2산화 유황이 물과 섞이면 흡열반응에 의하여 황산과 수소요오드로 변환된다. 이들 복합체는 일정 조건하에서는 물과 혼합을 하지 않기 때문에 물로부터 쉽게 분리가 된다. 황산은 850oC에서 이산화 유황과 산소로 분해되어 이산화 유황은 재순환을 한다. 요오

에너지부(DoE)는 지난 30년 동안의 기술발전을 토대로 과거 포기했던 잠재성 있는 개념들을 포함해서 새로운 열화학 개념들을 재고 하고 있다. DoE 연구프로그램은 높은 성능 (높은 효율, 저온, 복잡성 및 부식 경감)의 잠재력은 가지고 있으나 높은 기술적 위험도 내포하고 있다고 판단되는 열화학 공정들도 연구 대상에 포함 하게 된다

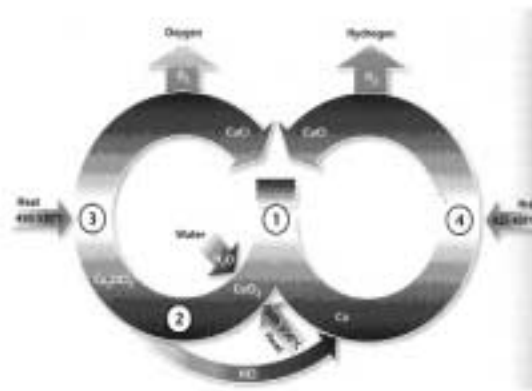
이들 대체 열화학 사이클들은 현재의 저온 전기분해와 825oC 이상의 고온을 요구하는 유황-요오드 사이클 사이의 기술적 갭을 연결해 주는 교량 역할을 하게 될 것이다. 약 550oC의 저온에서 운전되는 사이클은 두 가지 장점을 가지고 있다: 보다 적은 자재소요와 열 공급원의 융통성이다. 저온 사이클과 결합하는데 적합한 원자로에는 Candu-Mark 2와 같은 신행 초임계 원자로 또는 고온가스로(HTGR)가 포함 된다.

이러한 이유 때문에 Argon 국립연구소는 구리-염소(Cu-Cl) 저온 사이클을 조사하고 있다. 구리-염소 사이클은 그림 5와 같이 4개의 주 반응으로 구성된다. 수소는 425oC, 그리고 산소는 530oC에서 생성 된다. 이들 온도가 사이클의 최고 온도이다. 거기다 이들 반응에서는 가스와 고체 또는 액체만 생성 되므로 가스 방출로 사이클이 완성 되어 재순환 흐름을 최소화 시킬 수 있다. 비교적 저렴한 자재비와 49%의 이상적인 효율이 이 사이클의 장점이다. DoE는 잠재력을 가진 중요한 대안들이 누락 되지 않도록 하기 위하여 다른 미완성 사이클들을 발굴하여 평가하는 작업도 후원하고 있다

반응:

- ① $2 \text{CuCl} \Rightarrow \text{CuCl}_2 + \text{Cu}$
- ② $2 \text{CuCl}_2 + \text{H}_2\text{O} \Rightarrow \text{Cu}_2\text{OCl}_2 + 2\text{HCl}$
- ③ $\text{Cu}_2\text{OCl}_2 \Rightarrow 2 \text{CuCl} + 1/2 \text{O}_2$
- ④ $\text{Cu} + \text{HCl} \Rightarrow \text{CuCl} + 1/2 \text{H}_2$

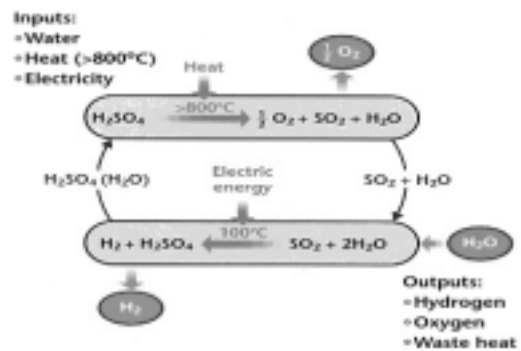
5

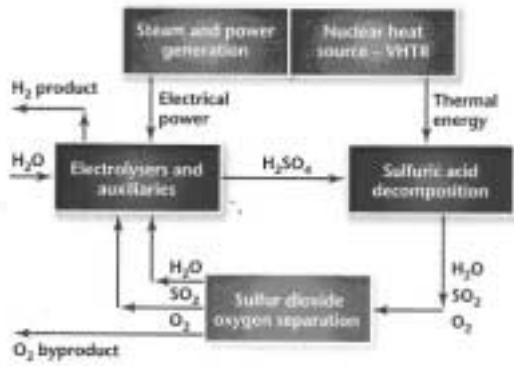


3. 하이브리드 사이클: HyS 사이클 (Hybrid Cycle: HyS Cycle)

수-분리 사이클이 최소한 한 개 이상의 전기화학 반응 단계를 포함하고 있으면 이 사이클은 하이브리드 열화학 사이클로 분류된다. 가장 잘 알려져 있고 연구가 진행 중인 하이브리드 열화학 사이클 (흔히 HyS 사이클이라고 부른다)은 웨스팅하우스 유황 사이클, 제너럴 아토믹스(GA)의 22 사이클 또는 Ispra Mark 11 사이클이다 (그림 6, 7 참조). 모든 열화학

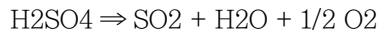
6



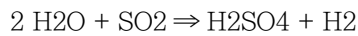


사이클은 유황-요오드 공정에서와 같이 최소한 3단계로 분리된 반응을 필요로 하지만, 하이브리드 사이클은 단지 2단계 반응만으로 수소 생산이 가능하다
2단계 Hy 사이클의 반응식은 아래와 같다

① 열화학 반응 (800-900 oC)



② 전기화학 반응 (100-120 oC)



전해조의 양극(anode)에 있는 이산화황(SO₂)은 물 분자의 전기분해에 필요한 가역 셀 전위를 크게 감소 시킨다. 온도 25oC에서 물을 직접 전기분해하기 위해 요구되는 가역 셀 전위가 1.23 V인데 비하여, SO₂ 사이클에서는 셀 당 0.17 V에 불과하다. 따라서 실제 SO₂ 사이클은 재래식 전기분해의 소요전력 25%로 운전이 가능할 것으로 예상된다. 여기에서 황산의 흡열 분열반응을 고려하면 HyS 사이클의 열 에너지 소요량은 직접 물 전기분해 보다 훨씬 적다. HyS 사이클의 이러한 열효율 장점을 극대화 하면서 설비의 복잡성과 건설비용을 최소화 하는 것이 앞으로 해결해야 할 숙제이다

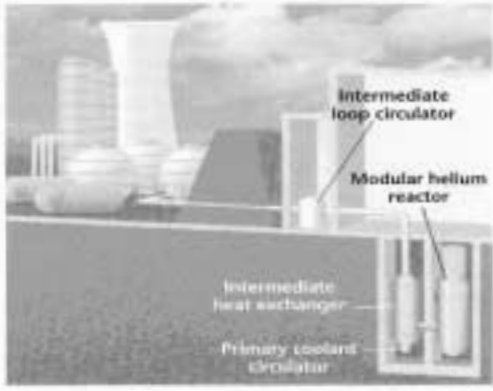
IV. 수소 생산을 위한 원자로

저온전기분해는 입력으로 단지 물과 전기만을 사용한다. 따라서 저온전기분해를 사용하는 수소생산은 원자로와 분리하여 멀리 떨어져 있어도 된다. 그러나 고온전기분해와 열화학 수-분리는 원자로로부터 입력 에너지의 일부 또는 전부를 열로 직접 받기 때문에 원자로 근처에 위치해야 한다. 원자로 냉각 루프와 수소생산 계통 사이에 설치된 중간 열수송 루프가 열을 원자로에서 수소 계통으로 전달 하기 때문에 원자로 냉각루프에서 누설이 있더라도 수소 생산 시설의 방사능 오염 또는 운전원 방사능 피폭이 발생할 위험이 없다. 또한 중간 루프는 수소계통의 유체가 원자로 계통에 유입하는 사고를 방지한다. 원자로는 열교환기가 요구하는 경계조건을 만족해야 한다. 예를 들어 고온전기분해, 유황-요오드 사이클 및 하이브리드 유황 사이클의 온도 요건은 모두 800-900oC 이다. 그러나 원자로심 출구와 수소계통의 열 입력 지점 사이에서 온도 강하가 일어나기 때문에 원자로냉각재의 실제 출구 온도는 950oC 이상이 되어야 한다. 구리-염소 사이클과 같은 저온 열화학 사이클에서는 이보다 온도가 낮아도 된다

사바나 국립연구소(SNL)는 열화학 사이클에 고온 열을 공급 하는 원자로의 선정 요건과 기준을 설정하고 이를 토대로 4세대 원자로를 포함한 후보 원자로형을 대상으로 평가작업을 실시하여 다음과 같은 결론을 도출 하였다

- 가압경수로(PWR)과 비등수원자로(BWR) - 요구되는 고온을 공급할 수 없다
- 알칼리성 금속냉각 원자로 - 고온에서의 재료 취약성 때문에 개발 위험 부담이 있다
- 중금속과 용융염 원자로 - 장래성은 있으나 상

8 |



당한 연구개발을 필요로 한다

- 가스냉각로 - 기본 선택, 헬륨 냉각로는 적당한 연구개발로 실용화가 가능하다

그림 8은 수소-마주라 헬륨 원자로(H₂-MHR) 조감도 이다. 그림과 같이 H₂-MHR은 지하에 설치된 600MWt 헬륨원자로 모듈로 구성되며, 매일 200톤의 수소를 생산한다. 비료를 생산하는 큰 암모니아 공장은 2개 모듈을, 그리고 큰 정유공장은 3개 모듈을 건설, 운영하여 이들로부터 필요한 수소를 공급 받을 수 있을 것이다. 현재 미국 산업체가 사용하는 수소 전량을 공급하기 위하여는 약 160개의 600MWt 모듈이 필요하다. 원자력을 이용한 산업용 수소생산은 앞으로 공업, 수송 및 연료 분야에서 수소가 광범위하게 사용 되는 수소경제에 도달하는 교량 역할을 하게 될 것이다