

태양열화학 기술

화학 반응에 필요한 고온의 열에너지를 태양열 고집광 기술을 이용하여 화학 에너지로 변환하는 기술을 소개한다.

한 귀 영

성균관대학교 화학공학과 (gyhan@skku.ac.kr)

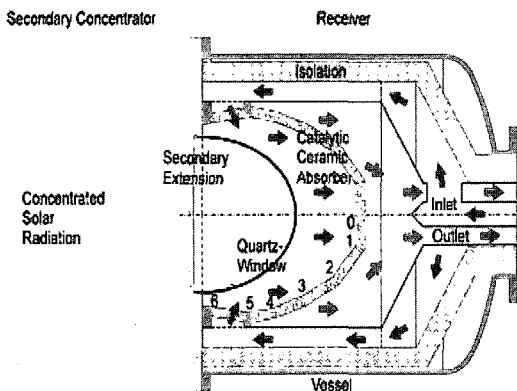
태양열화학은 현재 미국, 스위스, 독일, 스페인 등에서 활발히 진행되는 최신의 연구 분야로서 고집광 태양열을 이용하여 수소와 같은 에너지 수송 물질(energy carrier) 생산, 알루미늄, 주석과 같은 화학 물질 생산(chemical commodity) 그리고 오염 물질의 처리(detoxification of waste material) 연구에 중점을 두고 있다.

에너지 수송 물질 생산

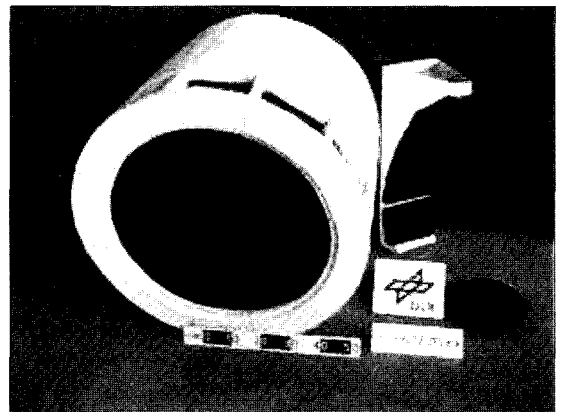
천연 가스의 개질을 통한 수소 생산

천연 가스를 수증기 개질하여 수소와 일산화탄소를 얻는 연구로서 이 반응은 약 850°C의 고온에서 일어나는 흡열 반응이다. 따라서 접시형 집광기의 흡수기를 반응기로 설계하여 천연 가스와 수증기를 반

응물로 하여 수소와 일산화탄소를 얻는다. 그림 1은 천연 가스 개질 반응기의 형태를 보여준다. 반응 가스는 집광에 의하여 고온이 유지되는 cavity 내부로 유입되어 반응 촉매막이 설치된 다공질 막을 지나면서 반응이 이루어진다. 그림 2는 반응의 핵심이 되는 다공성 금속 촉매막이다. 여기서 얻어지는 수소와 일산화탄소는 메탄을 합성을 하거나 Fisher-Tropsch 반응을 통하여 합성 가스를 만들 수 있다. 현재는 480 kWth 관형 반응기에서 약 850°C, 8~10기압의 온도, 압력 조건에서 80% 메탄 전환율을 얻고 있다. 향후 과제로 바이오메스에서 얻어지는 가스를 이용하여 합성 가스를 생산하고 이것으로 Brayton 사이클 동력 발전소를 운전하는 연구를 계획하고 있다.



[그림 1] 천연가스 개질 반응기

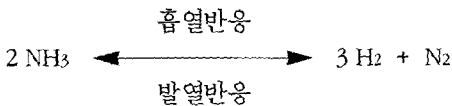


[그림 2] 반응 촉매막이 설치된 흡수기

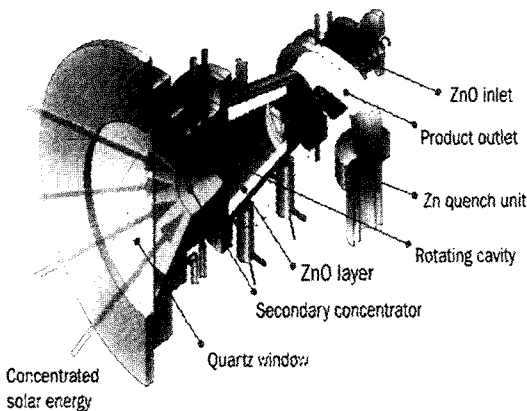
암모니아를 이용한 화학 열펌프

암모니아의 분해-합성 반응을 이용하여 태양 에너지를 화학 에너지로 저장하는 연구이다. 즉 암모니아의 분해 반응(600~750℃의 흡열 반응)을 통하여 태양열을 화학 에너지(수소와 질소)로 변환하여 열이 필요한 곳에서 암모니아 합성 반응(450~500℃, 발열 반응)을 통하여 화학 에너지로부터 열에너지를 회수하는 기술이다. 현재 호수 국립 대학에서 장기간 연구가 진행 중이며, 흡열 반응이 일어나는 흡수기의 온도는 약 600~750℃ 정도이며, 열회수를 위한 발열 반응기 온도는 450~500℃이다. 최근의 실험 결과 태양 에너지의 화학 에너지로의 전환 효율은 약 35% 정도이다. 현재는 흡열 반응을 위한 반응기 구조와 열회수를 위한 암모니아 합성 반응기(tube bundle 형태) 설계를 중점적으로 연구하고 있다.

암모니아의 분해 합성 열화학 펌프의 기본 화학 반응식은 다음과 같다.



이 화학 열사이클의 핵심이 되는 화학 반응 속도식, 반응 조건, 촉매 선정은 기존의 화학 산업에서 많은 연구가 이루어진 부분이기 때문에 이 반응을 태양열화학 공정에 적용하는데 큰 어려움은 없을 것이

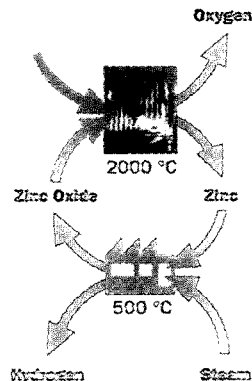


[그림 3] Zinc oxide 열분해 반응장치

다. 다만 반응기의 형태를 고온 집광형 흡수기에 적합하도록 변형하는 문제와 미 반응물의 회수, 그리고 열회수를 위한 합성 반응기로 수소와 질소의 수송에 대한 연구가 완결되면 상용화에 대한 기본 자료는 충분하다고 여겨진다.

Zinc oxide로부터 순수 zinc 생산

Zinc 산화물에서 산소를 떼어내어 순수한 zinc를 생산하는 연구이다. 집광된 태양 에너지를 이용하여 zinc 산화물을 zinc와 산소로 분해하고 바로 냉각하여 고효율의 분리를 가능케 하는 공정을 연구하고 있다. zinc는 향후 연료 전지, 배터리 등에 활용이 많으며, 또한 zinc는 물과 반응하여 미래의 에너지라 할 수 있는 수소를 생산할 수 있기 때문에 순수한 zinc를 다량의 에너지 소비 없이 얻는 것은 매우 바람직하다. 그림 3은 zinc oxide(ZnO)로부터 순수 zinc와 산소를 열분해하는 반응기의 형태를 보여준다. 고체인 zinc oxide가 집광된 태양 에너지에 의한 고온 흡수기에서 열분해되어 기체 상태의 zinc와 산소로 분해되는 반응이다. 한편 그림 4는 이러한 과정을 거쳐서 생산된 zinc를 수증기와 반응시켜 수소와 zinc oxide를 생산하는 공정의 도식화이다. 그림 4와 같은 공정이 실현되면, zinc oxide를 매개체로 하여 태양 에너지와 수증기의 투입으로 미래의 에너지인 수소를 대량으로 얻을 수 있다는 사실이다. 또한 최근에는 SynMet process 라고 하는 새로운 연구가 진행 중이다. 이것은 천연 가스와 ZnO를 반응하



[그림 4] Zinc의 산화반응을 통한 수소의 생산 공정

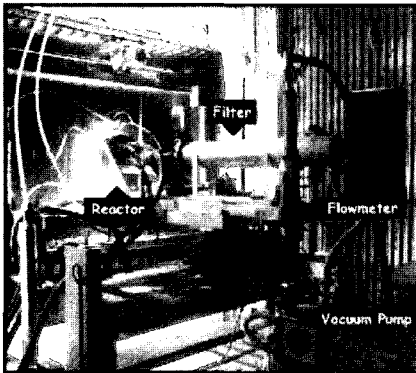
여 순수한 Zn와 합성 가스를 얻는 방법이다. 현재 2.0~5.0 kWth vortex flow 반응기에서 실험한 결과, 반응 온도 750~1200°C에서 매탄 전환율은 85~100%, 그리고 열효율은 11~28%라는 결과를 얻고 있다.

화학 물질 생산

Fullerenes and C-nanotube 합성

Fullerenes(C₆₀)은 새로운 형태의 탄소 물질로서 초전도 물질, 그리고 윤활제로서 연구가 진행되는 신물질이다. 한편 탄소 나노 튜브는 수소 저장 물질, 그리고 정보 저장 물질로 새로이 각광을 받고 있는 신물질이다.

기존의 fullerenes와 탄소 나노 튜브 생산 공정은

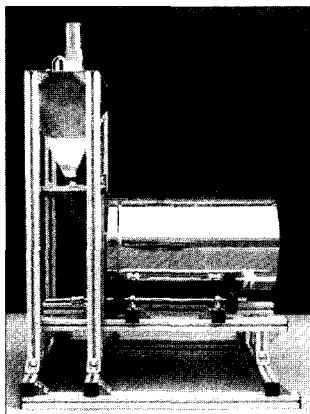


[그림 5] Fullerenes 합성을 위한 태양로 실험장치

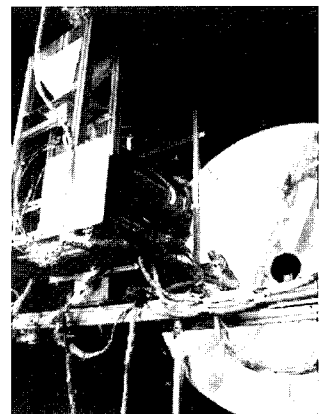
에너지 다소비 공정이며, 소량 생산이라는 단점이 있다. 또한 합성을 위한 반응 온도가 매우 높아서 에너지 다소비 공정이라는 단점이 있다. 때문에 태양 에너지를 고집광하는 태양로(solar furnace)를 이용한 반응기에서 이러한 물질을 합성하는 연구가 진행되고 있다. 특히 fullerenes는 매우 높은 합성 온도가 필요하기 때문에 태양로의 활용이 기대되는 분야이다. 현재 프랑스는 1000 kW 태양로에서 graphite target을 증발시켜서(반응 온도 2600°C) fullerenes 1.0 g/hr, 효율은 20%의 결과를 얻고 있다. 그림 5는 fullerenes 합성을 위한 태양로 실험 장치이다. 한편 탄소 나노 튜브의 경우, 현재는 CH₄, C₄H₁₀ 등의 탄화수소 기체를 650°C의 반응 온도에서 촉매 분해를 통하여 얻고 있으나, 태양열을 이용한 고효율 반응기 설계 연구가 진행 중에 있다.

limestone에서 lime 생산

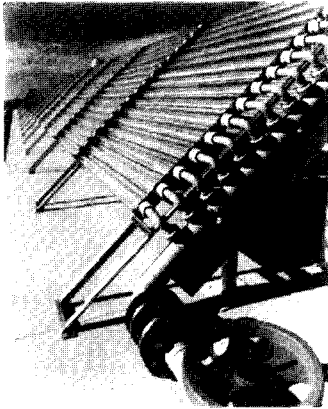
시멘트의 원료인 lime(CaO)은 limestone(CaCO₃)을 열분해하여 얻는다. 이 과정은 약 800°C 이상의 고온에서 이루어지기 때문에 집광된 태양열을 이용하여 열분해를 하여 시멘트 공장에서 열분해를 위하여 다량으로 사용하는 화석 연료를 절감하고, 또한 화석 연료의 연소에 의하여 필연적으로 발생하는 CO₂를 절감하고자 하는 것이다. 현재 스위스 PSI 연구소에서 10 kW pilot 규모의 열분해 공정이 연구 중에 있다. 그림 6은 solar lime pilot reactor이며 그림 7은 접시형 집광기의 흡수기 형태로 설치된 그림이다.



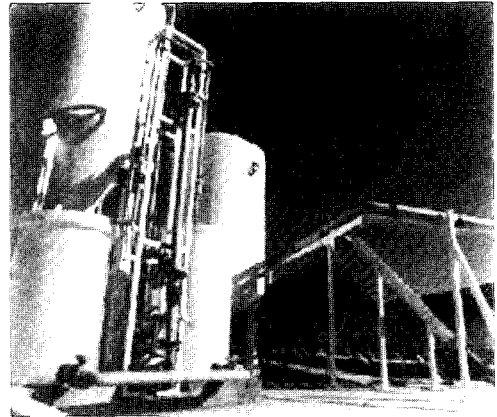
[그림 6] solar lime pilot reactor



[그림 7] 접시형 집광장치와 연계된 반응 장치



[그림 8] 광촉매를 이용한 물 정화 장치



[그림 9] 광촉매 분리장치

오염 물질 처리 공정

오염된 물의 정화

이 연구는 물속에 있는 유기물을 태양광과 광촉매를 이용하여 정화시키는 연구이다. 광반응기는 집광형 형태를 사용하며, 광촉매(TiO_2)를 슬러리 형태로 하여 집광된 태양의 자외선을 이용하여 광촉매를 활성화시켜서 광화학 반응에 의한 유기물 제거 기술이다. 현재 이 연구는 스페인, 독일, 포르투갈, 이탈리아가 공동으로 연구하는 대형 프로젝트이다. 그림 8은 물 정화를 위한 CPC 형태의 광화학 반응기를 보여주고 있다. 반응기 길이는 31 m, 집열기 면적은 $100 m^2$ 이며 이 연구 장치에서 약 800 liter의 오염된 물을 처리하는 공정이 실험 중에 있다. 한편 그림 9는 광화학 반응기의 출구 쪽의 정화된 물 속에 함께 나오는 미세 크기의 광촉매 입자를 회수하는 장치이다.

Olive oil mill waste water의 정화

올리브 오일 공장에서 배출되는 폐수를 광촉매를 이용하여 정화한 후 이 물을 관계 용수로 재활용하는 연구가 진행 중에 있다. 올리브 오일 폐수 중의 대표적 유기물인 폐놀을 제거하는 방법으로 3 가지 형태의 광화학 반응기가 고려 중이며, 현재는 박막 흐름 반응기(falling film reactor)에서 높은 제거 효율 결과를 보이고 있다.

농업 폐수 정화

농촌에서 발생하는 폐수 중에 주로 존재하는 질소 화합물(주로 아민 계통), 살충제 등이 함유된 농업 폐수를 광촉매를 이용하여 정화하는 연구가 진행 중이다. 광반응기는 집광형 형태이며, 광촉매는 TiO_2 를 기본으로 하여 전이 금속을 첨가한 형태이다. 현재 소형 광반응기에서 광분해 중에 발생하는 중간 물질의 특성 파악 연구가 진행 중에 있다. (28)