

2004국제 학회-228차 미국화학회

장소: 미국 필라델피아

기간: 8/22-8/26

228차 미국화학회에서 발표된 내용과 관련기술의 개요를 요약하였다.

1) 가스화 기술

산업 및 엔지니어링 화학 분과에서의 에너지 전환공정 연구는 열화학적 전환 공정과 관련된 내용이 대부분으로 폐기물 가스화, 촉매 반응에서의 합성 동역학, 평형 상태 조성, 나노 입자를 이용한 고분자의 합성, 열교환 시스템을 위한 액서지 분석이 발표되었다. 특히 작성자가 관심을 가진 열화학적 방법의 대표 논문으로는 '폐기물 가스화기를 위한 단일 평형 모델 연구'가 있었다.

가스화 기술은 고체나 액체인 탄화수소 원료를 열화학적 전환 반응에 의해 가연성 합성가스로 전환하는 기술로서 생성된 합성가스의 주성분은 수소와 일산화탄소가 된다. 화석연료의 가스화 기술은 산화제인 산소와 증기가 바이오매스 또는 폐기물 등과 고온에서 반응하여 복잡한 화학 반응을 통해 가연성 가스를 생성한다. 이들 가스화 기술을 크게 직접가스화, 간접가스화, 열분해로 구분된다.

전세계에서 발생하는 폐기물들은 생활 폐기물, 산업 폐기물, 농임산 폐기물 등으로 구분할 수 있으며, 특히 에너지로 전환할 수 있는 폐기물에 대한 관심이 지속적으로 증가하고 있다. 지금까지 폐기물을 에너지로 전환하기 위해서는 연소 방법만이 이용되었으나 최근에는 합성가스를 생산하는 가스화 기술에 대한 관심이 더욱 높아지고 있다. 또한 연소에 이용되는 가연성폐기물들은 에너지 분류상 재생에너지로 분류되기 때문에 중요성이 더욱 강조된다. Kim et al.이 발표한 폐기물 가스화 평형 모델은 5ton/day 규모의 고정층 가스화 공정에서의 폐기물 가스화에 따른 합성가스 생성 등을 분석한 것이다.

본 연구에서는 폐기물 가스화 공정을 묘사하기 위한 가이드 라인을 제공하고 최적의 운전 조건을 찾기 위해서 Chemkin 3.7 소프트웨어를 기반으로 하는 평형 모델을 개발하였다. 폐기물의 조성, 가스화 온도, 산소, 증기의 유량 등에 따른 이상적인 평형 상태에서의 가스 조성, 단일 조건에 따른 최종 온도, 가스화기에서의 냉가스 효율 등을 예측하는 것이다. 모델 결과는 증기/폐기물의 비율, 산소/폐기물의 비율 등을 기준으로 하여 나타냈으며, 최종 온도와 조성 등을 구하였다. 모델의 적용을 위해서 이상적인 폐기물의 형태를 가정하였다. 800-1,200°C의 운전 조건에서 증기/폐기물의 비는 0-1, 산소/폐기물의 비는 1.0-1.2에서 최적의 가스화 조건을 얻었다. 본 모델링의 결과는 실제 공정에서의 운전 가이드 라인으로 이용할 수 있다. (Kim, J.H., Im, H. G., Han, C., J. of ACS Abstracts, Division of I&EC, 22, 2004)

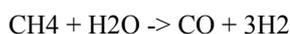
2) 수소 생산

셀룰로오스와 재생 물질 분과와 공동으로 개최된 유지력(Sustainability), 화학산업 분야에서의 에너지 전환기술에 관련된 논문들은 수소 이용 공정 개론, 재생 자원들로부터 얻어지는 화학 물질과 연료, 재생 자원을 이용하는 시스템 엔지니어링, 유지력을 위한 환경화학과 환경 엔지니어링, 화학산업 분야에서의 생태 효율 등의 내용을 발표하였다. 특히 수소 경제에 대한 논문 발표는 앞으로의 에너지 자원 연구의 동향을 예상할 수 있게 한다.

전기와 마찬가지로 수소는 자연적으로 발생하는 연료가 아니다. 수소는 반듯이 몇몇 자원들로부터 화학적으로 분리해내야 한다. 현재, 수소는 천연가스의 증기 리포밍 방법과 나프타 리포밍

공정에서의 부산물로서 대부분이 생산된다. 기후 변화에 대한 전세계적인 관심들과 화석 연료 자원들의 필연적인 고갈은 수소를 에너지 저장, 전달자로서 사용한다는 수소 경제 개념을 되살리고 있다. 수소 경제 개념은 전력 생산(중앙 집중식과 분산 발전)을 포함하여 산업, 주거, 이송 등의 모든 경제 활동 영역에서 에너지를 제공하기 위하여 수소를 사용한다. 수소 경제로의 성공적인 전환을 위해서는 현재 사용되거나 사용될 수 있는 에너지 자원들과 경쟁할 수 있을 정도의 낮은 비용으로 수소를 대량 생산하는 기술들이 필요하다. 현재 화석 에너지 연구, 개발, 시범 프로그램의 혁신적인 기술 부분인 수소 생산 공정들의 비교 분석들은 수소를 경쟁력있는 가격으로 생산하기 위해서 뿐만 아니라 환경에 대한 영향이 거의 없도록 하기 위한 개선된 공정들의 가능성을 뒷받침한다 (C. Lowell Miller, J. ACS Abstracts, Division of I&EC, 36, 2004.)

수소 생산에 대한 자세한 내용은 Elam 이 연료화학 분과의 연료전지 화학과 작동 분야에서 발표한 '수소 생산 기술과 시스템' 논문에 자세히 설명되어 있다. 전기와 마찬가지로 수소는 화석 연료, 재생에너지 자원, 원자력 등 다양한 방법으로 얻을 수 있다. 오늘날 수소는 상업용 열화학 공정으로 널리 알려진 천연가스로부터 1차적으로 생산된다. 특히 상업용 수소생산 공정의 절반 이상이 천연가스의 증기 개질 방법으로부터 얻어진다. 증기 개질 방법은 다음의 화학 반응을 이용한다.



미래에는 재생에너지 자원들로부터 직접 얻어질 것으로 예상된다. 그러나 지금과 같이 화석 연료로부터 여전히 수소를 생산할 것이다. 현재 이를 위해 개발되는 친환경 방법들은 자가 개질 (Autothermal Reformer), 가스화 복합 반응기 등이 개발되고 있다. 재생에너지를 이용하여 수소를 생산하는 기술로는 바이오매스를 이용한 수소생산(발효 공정, 바이오매스 열분해 공정, 초임계 공정), 풍력과 태양력을 이용한 수소생산, 지열과 수력을 이용한 수소생산 등의 방법이 있다.

현재 지구온난화에 따른 이산화탄소의 저감이 큰 문제가 되고 있다. 따라서 이산화탄소의 배출이 높은 증기개질, 석탄 가스화 기술들은 이산화탄소 포획과 분리 공정을 반드시 포함시켜야 한다. 이와 같이 현저하게 이산화탄소를 저감하는 방식-이산화탄소 포획과 분리-으로 수소를 생산하지 않고 이산화탄소를 전혀 배출하지 않고 수소를 생산하는 기술은 재생에너지와 원자력에 의한 전기를 이용들을 고려할 수 있다. 최종적으로 수소는 열화학적방법과 전해질을 이용한 방법으로 널리 생산되다가 결국 빛과 같은 재생에너지를 이용한 방법으로 생산될 것이다. 단기, 중기에는 천연가스로부터 직접생산 또는 전기로부터 직접생산하여 수소를 제공하나 다양한 에너지 분야에서 수소를 생산할 것이다. 다만 재생 에너지로부터의 수소 생산 비용(이산화탄소 발생이 전혀 없거나 거의 없는 방법)은 현재 화석연료(이산화탄소의 배출이 높음)를 이용한 방법에 비해서는 경쟁력을 갖추지 못했다 (Carolyn C. Elam, J. ACS Abstracts, Division of Fuel, 7, 2004.)

연료 화학 분과에서 개최한 수소 에너지 생산의 개발 분야에서는 기존의 증기 개질 방법의 수소 생산에 대한 발표가 있었다. Chellappa et. al. 은 석유화학, 비료, 에너지 저장 및 운반체로의 수소 사용은 앞으로 5-10년 사이에 급격하게 증가할 것이라고 말했다. 특히 재생에너지 자원을 이용한 수소 생산, 저장, 이송은 미래의 에너지원으로 가장 각광을 받고 있다. 현재 급성장할 것으로 예상되는 연료전지는 1차 에너지원으로서의 수소의 생산에 가장 큰 영향을 받을 것이다. 수소 생산 공정은 매우 다양하다. 메탄올 또는 암모니아를 통한 수소 생산은 소량, 고정 생산에 적합하다. 그러나 수소의 대량 생산은 대부분 개질 방법을 통해 이루어질 것이다. 미국의 수소 생산량은 현재 6000MM SCFD이며 매년 4% 정도 증가할 것으로 예상된다. 이 증가량

의 대부분은 개질기를 통한 저유황 디젤과 가솔린의 분해를 통해서 이루어진다.

증기 개질 방법은 천연가스의 개질 반응, 아연 산화물을 통한 황 제거, 수성가스 반응기 등으로 이루어진다. 증기가 천연가스와 혼합되어 예열되며 이를 원통형 개질기에 주입시킨다. 탄화수소에서 수소, 일산화탄소, 이산화탄소로의 전환은 니켈 계열의 촉매상에서 이루어진다. 개질기에서 배출되는 혼합가스들은 수성가스 반응기로의 주입전에 열교환된다. 수성가스 전환반응기에서의 반응은 일산화탄소와 수증기가 반응하여 이산화탄소와 수소를 생산하는 것으로 저온, 고온용의 2단 반응이 일반적으로 이용된다. 수성가스 반응기를 통과한 혼합가스는 PSA에서 95% 이상의 수소 흐름과 CO₂ 과량의 가스로 나누어진다. Topsoe 사에서는 개선된 수증기 개질 반응기를 발표하였으며 그 특징은 개질기 배출가스 온도의 고온화, 낮은 증기/탄소 비율, 높은 연소 공기의 예열, 단열 개질 반응, 높은 열교환 성능 등의 특성을 지닌다 (Niels R. Udengaard, J. ACS Abstracts, Division of Fuel, 197, 2004.)

3) 수소 저장 매체

수소가 새로운 에너지로 각광을 받으면서 이의 실용화를 앞당기기 위해 수소 생산뿐만 아니라 수소 저장 방법에 대해서도 많은 연구가 이루어지고 있다. 이에 따라 새로운 수소 저장 물질들에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있으며 현재까지 대상 물질들의 기초 이해와 개발, 밀도와 부피의 용량을 확장 등의 연구가 이루어져 왔다. 현재 연구되는 수소 저장 물질들은 전통적이지 않은 수소화물(촉매 복합체들), 탄소(모든 형태들: 나노 튜브, 나노 섬유, 황성 화, 다른 형태의 나노 다공성 탄소), 다른 다공성 물질, 재충전이 가능한 액체와 고체 물질 등이다. 특히 Thomas는 수소 저장을 위한 화학 시스템들에 대해서 발표하였다.

현재 자동차 연료로 사용되는 가솔린과 경쟁할 수 있는 성능을 갖추기 위해서, 수소 연료자동차를 위한 수소 저장 시스템들은 높은 에너지 밀도와 높은 비열을 가져야 한다. 수소와 연료전지 개발 분야에 대한 미국 대통령의 제안과 증가하는 연구 자금으로 인해, 높은 밀도를 지니는 수소 저장 매체에 대한 새롭고 뛰어난 연구들이 많이 이루어지고 있다. 현재 자동차에 수소를 저장하는 방법으로는 압축 가스와 액체 저장 탱크가 사용된다. 이 두 방법은 현재 지속적으로 개발되고 있으며 상대적으로 다른 기술들 보다는 성숙된 단계이며 상업적으로 이용이 가능하다. 압축가스 시스템들은 지난 몇 년간 매우 빠르게 발전했다. 탄소 나노 튜브를 가진 실린더 탱크들은 가볍고 견고하며 700bar까지 수소를 압축할 수 있다. 그러나 상온에서의 이 압력은 장기적인 사용이 어렵다. 액체 수소 저장은 BMW 사에 의해서 주도적으로 개발되고 있으며 다수의 데모 자동차가 Linde에 의해서 개발되었다. 액체 수소 저장의 높은 액화 비용을 낮추는 것이 연료로서의 이용을 확대하는데 가장 중요한 핵심이 된다.

현재 수소 저장 물질들로 개발되는 것들은 가역 반응이 가능한 재료들과 비가역 반응만을 하는 재료들이 있다. 가역 반응이 가능한 재료들은 가스 상에서의 수소 흡착과 탈착을 압력과 온도에 따라서 반복하게 된다. 그러므로 이런 물질들은 적절한 압력 상태에서 수소를 자동차에 저장하는데 이용될 수 있다. 반면 비가역 시스템들은 화학공정-저장을 위한 중간상 또는 추가 물질들을 필요로 한다. 이 경우, 소모되는 물질들은 고체나 액체 상으로 되어 있으며 자동차에서 쉽게 분리되고 재주입될 수 있어야 한다. 비록 가역 시스템들이 좀더 널리 이용될 수 있으나, 현재는 두가지 방법 모두 개발되고 있다 (George Thomas, J. ACS Abstracts, Division of Fuel, 6, 2004.)

4) 화석 연료 이용

우리가 수소 경제로 이동함에 따라, 석탄 가스화 기술은 수소 경제에 필요한 수소를 생산하는 실행 가능한 수단이며 이산화탄소를 격리할 가능성이 높은 수단으로서 매우 중요하게 보인다. 수소 생산외에도 석탄 가스화 기술로 만들어지는 일산화탄소 중간 생성물을 이용하여 화학 제품을

지속적으로 생산할 수도 있다. Eastman Chemical Company는 이와 같은 화학제품을 생산할 수 있는 석탄의 이용가능성을 예상하여 Kingsport 지역에 있는 높은 황함유량을 지닌 석탄을 이용하여 메탄올, 메틸 아세테이트, 아세트산, 아세트 안하이드라이드 등을 생산하기 위한 고순도의 일산화탄소를 1983년부터 생산해왔다. 이 외에도 비닐 아세테이트, 프로피오닉산, 프로피오닉 안하이드라이드, 메틸아크릴레이트, 아크릴레이트 등을 포함한 다수의 화학 제품들을 생산하는 기술들을 보유하고 있으며 적당한 생산 기회를 기다리고 있다. 천연가스를 이용한 화학 제품 생산 기술들과 비교한 Eastman Chemical Company의 석탄 이용 기술들을 나타냈다. (Joseph R. Zoeller, Prepr. Pap. Am. Chem. Soc, Division of Fuel Chemistry, 69, 2004)

석탄 화력 연소로 또는 가스화기에서 만들어지는 부산물인 높은 탄소 함유량을 지닌 촉는 현재 폐기물로서 처리된다. 2002년에는 거의 900Mt의 석탄이 연소되었고 107Mt의 석탄 연소 부가물들이 만들어졌다. 이 부산물들에는 연소되지 않은 석탄 또는 촉를 함유하고 있는 57Mt의 비산회재가 포함되어 있다. 그러나 매립 방법에 대한 규제가 증가함에 따라 발전소를 포함한 석탄 이용 유틸리티들은 탄소 함유량이 높은 촉들을 이용하는 기술들을 찾아야 한다. 이와 같은 수요 때문에 저자들은 석탄 연소 촉들을 이용하여 활성탄소를 만드는 1단계 공정을 이전에 개발하였다. 원료 물질들의 휘발 반응을 이용하는 2단계 활성탄소 제조 공정에 비해 촉는 연소로에서 휘발 반응이 이미 일어났기 때문에 1단계 활성탄소 제조 공정만이 필요하다. 저자의 기존 연구는 석탄으로부터 촉를 생산하는데 맞추어졌다. 본 논문은 연소 반응과 가스화 반응으로부터 생산되는 석탄과 바이오매스의 촉들의 물리, 화학적 특성을 비교하였으며 특히 활성탄소의 원료로서의 가능성을 비교하였다.

촉의 연구 결과에서 보면 목재를 기반으로 한 촉보다 LOI(Loss on Ignition)가 높다. 갈탄을 기반으로 하는 활성 탄소는 35%의 회재를 포함하고 있다. 목재 기반의 촉는 석탄 기반의 촉보다 무게 감량이 시작되는 온도가 낮았으며(180-300°C 사이에서 시작), 열반응은 매우 복잡하였다. 촉로 만들어진 활성탄소는 매우 높은 표면적을 가지고 있으며 이는 상업용 활성탄소와 견주어 비슷하였다. (Y. Zhang and B. Miller, Prepr. Pap. Am. Chem. Soc., Div. Fuel Chem., 49, 690, 2004)

5) 바이오매스

지금까지 전세계에서 수소는 천연가스, 석탄, 석유 등의 화석연료로부터 생산되었으며, 대부분 화학 물질을 만드는 원료로서 사용되어왔다. 그런데 최근 들어 바이오 매스가 낮은 비용으로 고부가 가치의 에너지를 생산할 수 있는 대안으로 떠오르고 있다. 바이오 매스는 전력 생산과 화학물질의 원료로 사용되는 수소를 친환경적 방법으로 생산할 수 있는 잠재력을 지닌 원료 물질이며, 바이오매스로부터 생산된 수소는 기존의 수소 사용처인 화학물질 생산 또는 새로운 사용처인 연료전지 등에 모두 이용될 수 있다. 또한 화석연료의 사용으로 환경 오염이 심해짐과 동시에 기후의 변화까지 발생하기 때문에 환경에 대한 영향이 거의 없는 바이오매스의 에너지화에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 그러나 바이오매스는 재배 가용면적, 생태 환경, 공급 환경 등의 영향을 많이 받는다. Baum 은 바이오매스를 기반으로 하는 화학물질들과 연료들의 생산 공정에 대해서 조사하여 발표하였다.

탄소와 에너지는 화학산업을 이끈다. 현재 산업 공정들은 원료와 에너지 자원으로서의 저렴한 원유로부터 나온 탄소원들에 영향을 주었다. 바이오매스 기반의 화학물질과 재생에너지는 경제성이 매우 약해서 아직 널리 사용되지 않는다. 현존하는 발효 공정들은 당분을 화학 중간체들 또는 연료를 생산하기 위하여 소수의 표준 발효 미생물들과 효소들에 과도하게 의존하고 있다. 새로운 미생물의 발견과 촉매 작용을 하는 효소들의 최적화는 새로운 기준을 제공한다. 그러나 이

새로운 미생물학(화학공학과 공학에 연결된)과 생태학의 정렬은 효율을 높일 수 있다. 수백만의 불분명한 세균들과 수억 개의 새로운 유전자들은 대사 생물학과 대사 유전학에서의 최신 기술들을 사용함으로써 근시일 내에 그 기능이 밝혀질 것이다. 이와 같은 발견들은 순수 화학 분야와 엔지니어링 분야를 동조시켜 바이오매스로부터 화학 중간체와 연료를 얻는 재생 공정을 만드는 데 도움이 될 것이다 (Bill Baum, J. of ACS Abstracts, Division of I&EC, 37, 2004.)

유지력(Sustainability), 산업 생태계(Industrial Ecology), 녹색 화학(Green Chemistry) 등은 새로운 개념들로서 다음 세대의 물질들-특히 재생에너지 자원으로 여겨지는 바이오매스-, 생산품들, 공정들의 개발 가이드라인이 된다. 생물에 기반을 둔 제품들은 지속 가능한 발전 목표를 달성하고 산업 생태계와 녹색 화학의 원리들을 실행할 수 있는 가능성을 보여준다. 미국 정부는 2010년까지 바이오 에너지와 바이오 기반 제품들의 미국 내 사용을 세 배로 증가시키려는 목표를 가지고 있다. 이 목표를 달성하는 것은 매년 농부들과 미국의 농촌 경제에 매년 15-20억불의 새로운 수입을 안겨다 줄 것이며, 1억3천톤의 탄소와 동등한 양의 지구 온난화 가스를 매년 줄이게 될 것이다. 미국 의회는 U.S. Farm Security and Rural Investment Act of 2002 (P.L. 107-171), Title IX Energy, Section 9002 (FARM BILL)을 통과시켰다. 이는 미국의 연방 정부가 바이오 기반 제품들을 구매하는 선택권을 주고 USDA(바이오 기반 제품들을 설계하는 가이드라인을 개발하고 연방 구매를 위한 바이오 기반 제품들의 목록을 작성)에게 청구하도록 한다 (Ramani Narayan, J. of ACS Abstracts, Division of I&EC, 40.)

6) 에너지의 미래

수소의 생산, 이용 등 수소 산업 경제(Hydrogen economy)가 필연적이라는 사실은 기름이 산업의 기초로서 사용되는 현재에는 믿겨지기 어려울 것이다. ExxonMobil, BP, Shell, Texaco 등을 포함하는 석유와 가스 다국적 기업들은 항상 포춘지(the Fortune)의 500대 대기업 집단(수입을 기준으로 하는)의 상위에 포함된다. 전세계 석유 사용량은 최고조에 달하였으며 1999년을 기준으로 매해 35억톤을 소비하고 있다. 석유 가격의 등락은 석유수출국기구(the Organisation of Petroleum-Exporting Countries: OPEC)의 산유량 제한에 의해 결정되고 있다. 이렇듯 석유는 현재 전세계 에너지 시장에서 매우 중요한 위치를 차지하고 있다. 그러나 19세기부터의 에너지 역사를 살펴보면 수소 에너지가 석유 에너지의 자리를 대체할 것임을 확신할 수 있다. 미국화학회에서도 미래의 에너지에 대한 발표가 있었으며, Gray는 미래의 연료를 위한 석탄의 역할에 대해서 정리하였다.

만약 세계의 오일 생산이 정점에 달하여 앞으로의 10-30년 사이에 감소한다면, 미국의 에너지와 경제 안전은 매우 위태로울 것이다. 중유와 오일 샌드와 같은 비상용화된 자원들은 미래의 원유 생산에 중요한 역할을 하게 될 것이다. 그러나 이들의 생산 속도도 현재 생산되는 오일 감소분을 충당하기에는 부족하다. 수소를 기반으로 하는 에너지 시스템은 결국 오일의 수요를 감소시킬 것이나 오일 수요가 정점에 다다르기 전에 수소 경제로의 전환이 원활히 이루어질 것임을 확신할 수가 없다. 이송 분야에서의 오일 수요를 감소시키는 다른 수단들은 에너지 효율을 향상시키고 각국에서 풍부한 에너지 자원들로부터 연료를 생산하는 것이다. 이들 자원들은 바이오매스, 천연가스, 오일 암석, 석탄 등이다. 바이오매스 연료들은 잠재력이 한정되었으며, 미국의 천연가스 생산은 점차 감소할 것이다. 오일 암석은 상용화된 채취 방법이 아직 없다. 가장 실용적인 방법은 석탄을 이용하는 것이며, 이 논문에서는 석탄 이용의 기술적, 경제적, 환경적 영향을 고찰하였다.

현재 석탄을 이용하여 청정 액화 탄화수소 연료를 생산하는 공정은 거의 이용되지 않고 있다. 미국에서는 2개의 복합 가스화 플랜트가 운전되고 있으나 모두 전력만을 생산하고 있다. 이는 Tampa 플랜트와 Wabash 플랜트이며 모두 비산 흐름 가스화 타입의 반응기를 사용하고 있다. 현재

의 석탄 액화 공정을 이용한다면 1배럴에 37불의 비용이 들 것이며 개선된 액화 공정을 이용한다면 31불로 낮출 수 있을 것이다. 다만 이산화탄소 제거 공정이 포함되면 비용은 40불로 상승할 것이다. 석탄을 이용하여 수소를 생산하면 비용은 6.5-7불/MMBtu가 될 것이다. 최신 석탄 가스화 공정을 이용하여 수소를 생산하면 5.5불/MMBtu로 낮아질 것이다. 석탄 가스화를 통한 수소 생산 공정의 단가를 낮추는 방법은 고체산화물 연료전지를 포함하여 운전하는 것으로 이를 통해 4.0불/MMBtu로 낮출 수 있을 것이다. 현재 상업용 천연가스 증기 개질 방법의 수소 생산 비용은 5.5불/MMBtu이다 (D. Gray and G. Tomlinson, Prepr. Pap. Am. Chem. Soc., Div. Fuel Chem., 119, 2004. 1)