

유동층반응기에서 촉매를 이용한 메탄 열분해

장현태^{1*}, 이지윤¹, 차왕석²

Thermal Decomposition of Methane Using Catalyst in a Fluidized Bed Reactor

Hyun Tae Jang^{1*}, Ji Yun Lee¹ and Wang Seog Cha²

요약 본 논문은 유동층반응기에서 메탄 열분해에 의한 수소 생산과 탄소 생성에 대한 연구를 수행하였다. 환경에 대한 영향을 최소화한 상태에서 one-step에 의한 메탄의 전환반응을 메탄 분해촉매활성에 영향을 미치는 인자에 대하여 연구하였다. 측정된 압력요동특성치의 해석을 통하여 유동층 열분해촉매의 유동화현상을 측정하였으며, 유동화특성에 따른 메탄열분해능을 측정하였다. 메탄의 분해능은 생성되는 수소의 농도로 부터 측정하였다. 유동층의 특성인 층내 입자 이동성, U-Umf, 마모, 비산유출, 유동화가스의 효율밀도에 따른 분해효율에 미치는 영향을 고찰하였다.

Abstract In this paper, Thermocatalytic decomposition of methane in a fluidized bed reactor (FBR) was studied. The technical approach is based on a single-step decomposition of methane over carbon catalyst in air/water vapor free environment. The factors affecting methane decomposition catalyst activity in methane decomposition reactions were examined. The fluidization phenomena in a gas-fluidized bed of catalyst was determined by the analysis of pressure fluctuation properties, and the results were confirmed with characteristics of methane decomposition. The effect of parameters on the H₂ yield was examined for methane decomposition. The decomposition rate was affected by the fluidization quality such as mobility, U-Umf, carbon attrition, elutriation and effectiveness density of fluidization gas.

Key Words : Thermocatalytic, Methane Decomposition, Fluidized Bed

1. 서론

현대산업사회 발전의 원동력은 에너지 획득능력에 의 존하므로 각국은 에너지 안보차원에서 에너지원 확보와 신기술 개발에 주력하고 있다. 최근 부각되고 있는 화석 연료사용에 따른 지구온난화 가중에 따른 온실가스의 배출과 환경오염문제에 대한 관심증대와 영원한 에너지원인 태양력, 지열, 풍력, 조력 등의 환경에너지의 개발에 선진국들은 관심을 증대하고 있다.

또한 석유 및 천연가스 등의 한정적 매장량으로 인하여 환경에너지의 개발이 이루어지기 전까지 원활한 에너지의 수급을 위하여 풍부한 매장량을 지닌 석탄을 이용한 에너지원 확보에 연구방향을 집중시키고 있다. 그러나

석탄의 경우 연소시 발생하는 막대한 양의 이산화탄소로 인하여 사용이 둔화되고 있으며, 발전용으로 만 사용이 가능하다. 이러한 많은 매장량을 지닌 보다 현 메탄의 매장량이 더 큰 것으로 조사되고 있다. 이와 같이 많은 매장량을 지닌 메탄의 이용에서도 문제시되는 것은 메탄 연소시 발생하는 이산화탄소 때문이다. 따라서 최근에는 메탄에서 수소만을 분리하고 탄소는 이용 후로 미루는 방식이 개발되기 시작하였다¹⁾. 또한 수소의 경우는 연료 전지를 대표적으로 청정화하여 사용할 수 있는 방안이 매우 많기 때문에 차세대 청정에너지원으로 각광을 받고 있다.

메탄에서 수소만을 선택적으로 취하는 방법에 현재 여러 방법이 제시되고 있으나 가장 고전적이면서도 높은 상용화 가능성을 지닌 것은 촉매열분해 방법이 될 수 있다. 이러한 촉매분해방법에서는 일반적으로 정유공정에서 수소첨가반응이나 개질반응에 사용되는 촉매의 탄소에 의한 피독이 발생될 때와 같은 현상을 이용하므로 메탄에서 수소만을 취하게 된다. 메탄 분해반응은 기체화합

이 논문은 2007년도 한서대학교 교비 학술연구 지원 사업에 의하여 연구되었음

¹한서대학교 화학공학과

²군산대학교 토목환경공학과

*교신저자: 장현태(htjang@hansco.ac.kr)

물이 분해되어 기체상인 수소를 생성시키고 부생성물로는 고체의 탄소입자를 발생시키게 된다. 또한 발생된 탄소입자가 촉매의 표면에 침적되어 피독현상을 나타내게 되며, 피독이 일어난 후 탄소에 의하여 일부 메탄의 분해 반응이 진행되나 금속촉매를 사용한 경우보다는 낮은 효율을 나타내게 된다^{2,3)}.

따라서 메탄의 수소화에 따른 활용방안이 다각적으로 검토되고 있으나 유동층반응기를 이용한 메탄의 연속적 생산에 대한 보고는 아직 없다^{4,5)}. 유동층반응기를 이용할 경우 메탄 분해반응은 다음과 같은 유동층반응기의 장점으로 인하여 활용가능성이 매우 높다고 할 수 있다. 유동층반응기의 특성인 기체-고체간의 접촉효율이 우수하므로 고온에서 반응이 일어나는 메탄분해반응의 열전달 속도가 빨라지므로 효율이 상승하며, 열전달계수가 높으므로 인하여 다른 반응기보다 열회수율이 높아 장치의 소형화가 가능하다. 또한 메탄의 분해반응시 생성되는 탄소는 금속촉매표면에 침적되게 되나 유동층반응기에서는 높은 이동성 및 운동성으로 인하여 많은 마찰이 발생되고 마찰의 결과로 입자들이 분쇄되어 층 상부를 통하여 배출되게 된다^{6,7)}. 이러한 특성은 메탄의 분해반응시에는 반응의 방해 단계로 작용하지 않고 오히려 금속촉매 표면에 발생되어 침적된 탄소입자를 연속적으로 마찰하여 수소 및 미반응 메탄과 함께 층 외부로 배출하게 되므로 연속적인 조업이 가능하게 된다. 탄소가 금속촉매 표면에 침적된 금속촉매와 유동층반응기 외벽간의 마찰, 탄소가 침적된 금속촉매간의 마찰 또한 내부 방해판과 탄소에 침적된 금속촉매와의 마찰에 의하여 연속적으로 금속촉매입자로부터 탄소입자를 제거하므로써 높은 수율을 얻을 수 있다^{8,9,10,11,12)}. 따라서 현재 메탄으로부터 수소 생산 공정^{13,14,15,16)}에서 주로 연구되는 공정인 반응과 재생공정을 swing 형태로 운전되는 2탑식 고정층 운전방법에서 탈피하여 운전할 수 있다. 또한 재생공정과 반응공정의 유동층을 결합한 외부순환식 2탑 유동층의 운전도 가능하게 된다. 이러한 유동층을 이용한 공정의 유동층 특성 자료를 도출하기 위하여 금속촉매에 의한 메탄의 전화율을 철계열 및 SiC를 대상으로 연구하였다.

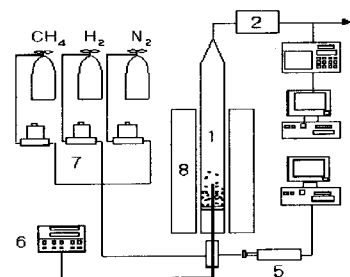
유동층부는 내경 18.5 mm, 높이 0.5 m의 관형 석영관으로 제작하였으며, 유동층부 하부에 sintered quartz로 제작된 분산판을 설치하였다. 유동층 상부에는 입자간 마찰 및 입자와 반응기 기벽간의 마찰로 생성되어 배출되는 미세입자를 포집하여 마모도를 조사할 수 있게 필터를 설치하였다. 반응기 온도는 plenum과 유동층부를 관형 전기로에 위치하도록 하여 전기히터를 이용하여 조절하였으며 외부는 ceramic wool로 단열하였다. 유동화가스이며 반응물인 메탄은 실린더에 압축된 메탄(순도 99.9%)를 사용하고 안정된 공급을 위하여 정압기, 필터, 제습탑, 산소 제거탑을 통과한 후 MFC를 이용하여 공급하였다. 또한 농도 영향을 고찰하기 위하여 메탄과 불활성가스인 질소를 MFC를 사용하여 조절하였으며 완전혼합 후 유동층으로 공급하기 위해 mixing chamber를 설치 운전하였다.

측정부는 유동화 동특성과 혼합도 및 반응 진행도를 외부 진단할 수 있도록 압력요동신호 측정부와 반응기 온도측정부, 가스농도 측정부로 구성되었다. 압력요동신호 측정부는 압력전달기, 압력전달기를 시동시키는 직류 전원공급기, A/D 전환기, 측정된 신호를 계산, 기록하는 컴퓨터 부분으로 구성되었다. 온도측정부는 유동층 각 높이에 따라 K-type 열전대를 사용하여 반응 층의 온도 변화를 측정하였다. 반응기로 공급되는 CH₄ 농도와 반응 후 CH₄, H₂ 농도는 분산판 아래 plenum으로 공급되는 기체층 일부와 층상부에서 미분 제거용 filter를 거친 가스를 G.C.를 사용하여 분석하였으며 CH₄은 FID가 장착된 G.C.(Model 6890N, Agilent Co.)를 이용하여 분석하였고 H₂는 TCD가 장착된 G.C.(Model 580, Gow-Mac Instrument Co.)를 이용하여 분석하였다. 두 대의 G.C.을 on-line으로 연결하여 6-port valve를 이용하여 G.C.로 공급 분석하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

본 연구에서 사용한 유동층 반응장치는 Lab scale이며, 개략도는 그림 1 와 같다. 반응기는 크게 유동층 반응기, 마모입자 포집부, 가스공급부 및 측정부로 구성되었다.



1. Fluidized bed reactor 2. Filter
3. Gas chromatograph 4. Personal computer
5. Pressure transducer 6. Temp. controller
7. Mass flow controller 8. Electric heater

[그림 1] 촉매를 이용한 메탄 열분해 유동층 반응기.

2.2 실험방법

실험은 석영으로 제작된 유동층에 철 계열 촉매를 충전한 후 수소와 질소를 이용하여 유동화시킨 상태에서 온도조절기를 이용하여 유동층 온도를 반응온도까지 상승시킨다. 이때 사용된 수소에 의하여 철계열 촉매의 일부 산화된 성분의 환원이 일어나고, 유동화 상태가 안정된 후 가스공급부에서 수소의 공급을 중단하고 메탄을 공급한 후 질소 공급량을 조절하여 메탄의 농도를 일정하게 유지한 상태에서 유동화를 발생시킨다. 이때 조업변수인 유동화속도 및 메탄의 농도에 따른 실험을 수행한다. 또한 층상부에 설치된 필터에서 비말동반된 탄소 입자를 포집한다. 또한 메탄의 공급과 동시에 유동층 하부에 설치된 압력전달기를 이용하여 압력요동신호를 측정하고, G.C.를 사용하여 메탄 및 수소의 농도를 측정한다.

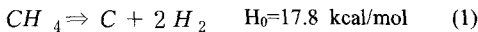
2.3 시료

메탄분해 촉매 : 본 연구에서 사용한 금속촉매는 전이 금속계열로 Fe를 사용하였다. 사용된 Fe는 전해철로써 순도 99.5%이고, 입자크기는 140/200 mesh로 평균입경은 0.089mm이다. 가장 반응성이 우수한 Ni의 경우 softing 현상에 의하여 메탄 분해반응 온도에서 유동층 내 sintering 현상이 발생한다. 따라서 sintering에 의하여 유동화현상이 중단되므로 softing 온도가 높은 철 계열을 대상으로 실험을 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 메탄의 분해

메탄의 열분해 반응은 매우 간단한 반응으로써 다음의 식(1)과 같은 반응만이 존재 한다.



메탄의 분해반응은 흡열반응으로써 전환율은 온도에 크게 의존하며 반응온도와 더불어 높은 열전달을 요구한다. 기고 유동층은 층상부에서 공급되는 기체에 의하여 층내에 기포가 형성되고 형성된 기포에 의하여 층내의 입자가 이동성을 가지게 되므로 층내의 유동화 입자가 이동하므로써 층내 전열면적이 커지고 열전달이 우수하여 진다. 또한 유동층내의 온도분포가 균일하고 본 반응과 같이 연속적으로 다량의 열을 공급하여야 하는 경우에 높은 전열강도로 인하여 층내 전 영역을 동일 온도로 유지 할 수 있다.

3.2 유동화 특성 진단을 위한 압력요동 특성치

유동층내 거동을 관측할 수 있는 방법은 압력요동, 온도 등 제한적이다. 따라서 제한적인 특성치를 이용하여 유동층의 거동을 해석하고 이로부터 유동층 동특성을 파악하고 조업변수를 설정하여야 하므로 유동층의 내부현상을 관측할 수 있는 방법에 대한 연구와 기존 연구결과를 본 연구 메탄 분해반응과 금속표면에 침적된 탄소의 마찰과 마모에 의한 비산유출을 이용한 층내 반응현상의 해석을 위하여 다음과 같은 유동층의 압력요동 특성치를 계산하여 이를 적용하고자 한다.

타 연구자들에 의하여 제시되었고, 유동층연소로의 해석에 적용되어 활용하고 있는 몇 가지의 계산 값들을 고찰 하여 보면 다음과 같다

물리적 현상에 의해서 나타나는 데이터는 deterministic data와 non-deterministic data로 분류 할 수 있다. deterministic data는 명확한 수학적 관계식으로 표현될 수 있으며, non-deterministic data는 수학적 관계식보다 확률과 통계적 방법으로 해석 될 수 있다. 유동층에서 일어나는 압력요동 신호는 non-deterministic data로써 이를 다음과 같이 표현 할 수 있다.

물리적 현상에 의한 random data는 정적성분(time invariant)과 동적성분(dynamic property)으로 구성되어 있다. 유동층에서의 압력요동 data의 정적성분 즉, 평균치는 층내입자에 의한 평균압력을 나타내며 식(2)과 같다. 임의의 시간 t에서 ensemble의 각각 sample function의 값을 취하여 sample function의 수로 나누어 얻을 수 있다. 동적 성분은 variance의 positive square root인 표준편차로 기초적인 data의 intensity를 의미하며 식(3)와 같이 표현된다^{11,12}.

$$\mu_x = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T X(t) dt \quad (2)$$

$$S.D. = \left[\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T (X(t) - \mu_x)^2 dt \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

Power spectrum density function은 random data의 시간영역함수를 빈도수 영역으로 변환시킨 함수이며 auto-correlation function의 Fourier transform한 것으로 식(4)과 같다¹⁷.

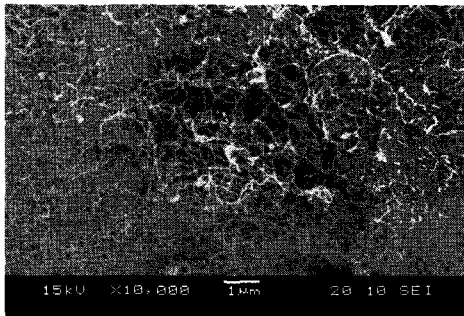
$$G_x(f) = 2 \int_{-\infty}^{\infty} R_x(\tau) \exp(-i2\pi f\tau) d\tau \quad (4)$$

이와 같은 압력요동의 특성치를 이용하여 메탄분해 반응유동층 거동을 층 외부에서 on-line상태로 연속적으로

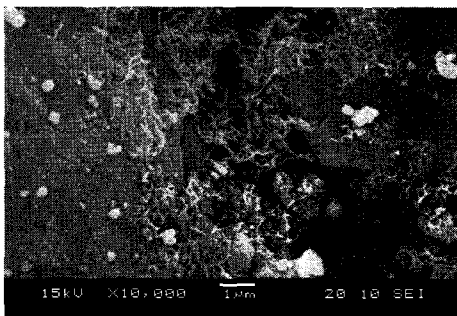
측정되는 압력신호값을 계산하여 요동특성치를 구하고 층내 현상을 해석할 수 있는 방법과 압력요동특성치 값과 층내 현상의 상관관계를 규명하였다. 즉, 압력요동의 표준편차와 평균치로부터 생성되는 탄소의 양과 증대되는 입자크기를 측정하고자 하였다.

3.3 마모 유출 특성

유동층내에서 미세분진의 생성 및 배출 특성은 다음과 같다. 유동층내에서 마모입자는 입자와 입자간의 마찰, 입자와 기벽간의 마찰, 입자와 screen간의 마찰, 입자와 유동화공기간의 마찰, 열이력에 의한 균열 등으로 생성된다. Pis 등³⁾은 유동층에서 발생하는 마찰 현상을 단순하게 입자의 충돌에 의한 분쇄로 설명하였다. Abrasion은 최초의 입자가 작은 입자를 생성하고 초기입자는 최초크기보다 약간 작은 상태로 남아 있는 상태이며, fragmentation은 최초의 입자가 여러개의 입자로 마모되는 것으로 분류하여 설명하였다. 본 연구의 메탄분해 유동층반응기에서 메탄분해시 발생된 탄소 중 마모에 의한 비산유출로 필터에서 포집된 탄소(가)와 유동층내 금속 촉매입자 표면에 생성된 탄소(나)를 그림 2에 나타내었다.



(가) 필터에 포집된 탄소 형상

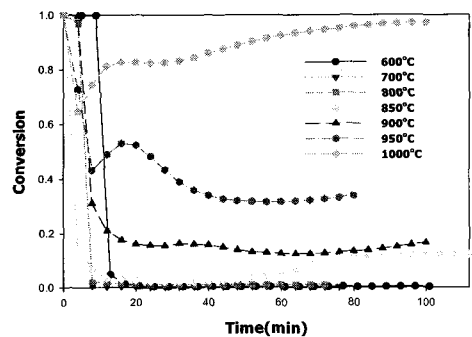


(나) 층내 입자에 생성된 탄소 형상

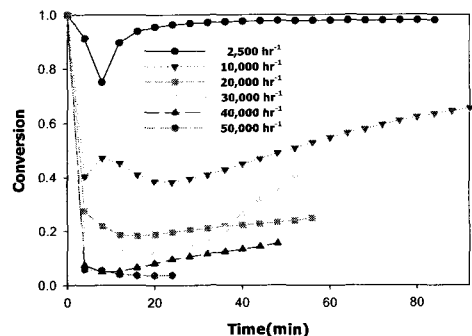
[그림 2] 메탄 분해 유동층반응기에서 생성된 카본입자 형상(가. 필터에 포집된 탄소 형상, 나. 층내 입자에 생성된 탄소 형상)

3.4 메탄분해반응

그림 3은 온도에 따른 메탄의 생성율을 시간에 대하여 나타낸 그림이다. 그림에서 온도 상승에 의하여 증가하는 것으로 나타나고 있으며, 이는 온도가 메탄 분해에 의한 카본 생성에 가장 큰 변수로 작용하기 때문에 나타나는 현상이다. 또한 메탄의 분해에 의하여 촉매표면에 생성 침적된 카본에 의하여 분해속도가 느려지기 때문^{8,9)}에 900℃ 미만에서는 반응개시 후 20분 이전에 전환율이 5%이하로 나타나고 있다. 반면에 온도의 영향은 있으나 900℃ 이상의 온도에서는 온도에 따라 전환율이 증가하는 것으로 나타나고 있다. 950℃와 1000℃에서는 반응개시 후 탄소의 침적에 의하여 반응속도가 느려지는 현상이 메탄 전환율에서 나타나고 있으며, 이러한 전환율의 감소는 두 온도영역이 동일하게 15분 정도 경과 후 감소되던 전환율이 증가하는 것으로 나타나고 있다. 이러한 전환율의 역전 현상은 고온에서 메탄의 분해에 따른 탄소 생성율이 높고 유동층의 특성인 입자간의 마찰 및 입자와 유동층 기벽간의 마찰에 의하여 입자표면에 침적된 카본이 마모 비산 유출되므로 인하여 발생하는 현상으로 고정층반응기의 경우 탄소 생성에 의하여 반응영역이 증가되므로 반응의 연속성이 없게 된다.



[그림 3] 온도에 따른 메탄 전환율 변화(입자경 0.08mm)



[그림 4] 공간속도에 따른 메탄 전환율 변화(반응온도 1273K, 입자경 0.08mm)

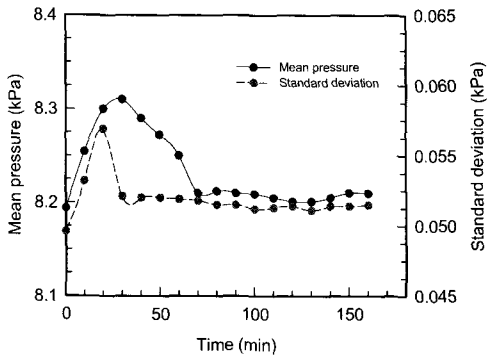


그림 5. 유동층 조업시간에 따른 압력요동의 표준편차와 평균압력 변화

반면의 이와 같은 반응의 경우 유동층의 사용에 의하여 생성되는 탄소가 비산유출되어 층외부로 제거되므로 연속적인 반응이 가능하다.

이러한 입자의 비산유출에 의한 영향은 그림 5의 시간에 따른 압력요동의 표준편차와 층내 평균압력의 변화로써 알 수 있다. 유동층에서 압력요동은 기포에 의하여 발생되며, 압력요동의 표준편차로서 기포의 거동과 기포거동에 의하여 가장 큰 영향을 받는 유동층의 이동성을 나타내준다. 시간에 따른 압력요동의 표준편차가 증가하는 것으로써 층내의 기포의 크기가 커지고 있고 마모된 작은 입자에 의한 치밀도가 증가하고 있음을 알 수 있다. 또한 시간이 경과함에 따라 증가하던 압력요동의 표준편차가 감소하는 것으로 나타나고 있다. 이는 반응 전환에 따른 탄소 발생과 비산유출에 의한 층내 탄소 제거율이 각 조건의 반응 및 유동화 조건에서 평형상태로 이동하므로 나타내는 것이다. 이는 동일온도의 그림 3에 나타난 전환율과 압력요동의 표준편차 변화를 비교하면 마모 및 비산유출과 탄소생성율의 변화 값에서 알 수 있다. 또한 유동층내의 평균압력의 경우 반응의 개시 후 증가하다 15분경에서 급격히 감소하고 일정한 값을 나타내는 것을 그림 5에서 알 수 있다. 유동층의 평균압력은 유동층 내 고체 체류량을 나타내며 본 반응의 경우 반응전환에 의하여 기체의 몰수가 증가하므로 인하여 나타나는 현상과 층내에 생성된 탄소에 의한 증가 및 마찰에 의하여 생성된 작은 입자에 의한 층내 치밀도 증가가 주된 원인으로 작용한다. 일정 시간 경과 후 급격한 감소는 탄소 생성율과 비산유출율이 운전조건에서 평형상태 도달 전 생성율 증가에 의하여 나타나는 것으로 마찰과 비산유출의 증가에 의하여 급격한 전이가 일어나게 된다. 이러한 현상은 온도에 따른 결과에서도 반응 전환율의 증가에 의하여 더욱 급격히 나타난다.

이러한 비산유출에 의한 변화는 그림 4의 공간속도에 따른 변화에서 알 수 있다. 그림은 동일한 온도(1000℃)에서 공간속도를 2,500~50,000 hr⁻¹ 까지 변화시키며 반응한 결과로써 유동층에서 공간속도의 증가는 유량의 증가를 나타내며 따라서 층내 입자의 이동성의 증가와 비산유출의 증가를 나타낸다. 실험에서 공간속도 증가에 따라 접촉시간 감소로 인한 반응전환율 감소가 나타나고 있다. 반면에 반응전환율 감소 후 마찰에 의한 촉매 재생에 의하여 나타나는 전환율 상승은 2,500, 10,000 hr⁻¹에서는 확연히 나타나고 있으나 10,000hr⁻¹ 이상의 공간속도에서는 완만한 증가 현상이 나타나고 있다. 즉 반응전환율의 감소에 의한 탄소 생성을 저하와 이동성 증가에 따른 마모 및 비산유출이 증가되어 나타나는 현상이다. 따라서 유동층에서 메탄 열분해는 고정층과 다르게 촉매입자 표면에 생성된 탄소의 마모 및 비산유출에 의하여 연속적 조업이 가능하며, 유동층 외부에서 압력요동 특성치를 측정하여 층내 상태를 모니터링하여 운전이 가능함을 알 수 있었다.

4. 결론

유동층에서 비표면적이 매우 낮은 Fe를 이용하여 메탄 분해 실험을 수행한 결과 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

1. 유동층에서 평균 입자경 0.08 mm 전해 Fe를 이용한 메탄의 분해는 1,000℃ 이상, 공간속도 2,500hr⁻¹에서 98%의 전환율을 얻을 수 있었다.
2. 유동층에서 메탄의 분해반응은 시간에 따라 변화하는 현상을 나타내며, 이는 촉매표면의 분해 생성물인 탄소 침적이 나타나며, 유동층 기포에 의한 입자 이동성에 의하여 침적된 탄소 마모가 발생되고, 마모 발생된 미세입자가 비산유출되므로 인하여 촉매의 재생이 일어난다. 이러한 현상이 평형이 되는 영역에서 운전조건에 따른 평형전환율이 결정됨을 알 수 있었다.
3. 유동층에서 메탄 열분해는 고정층과 달리 촉매입자 표면에 생성된 탄소의 마모 및 비산유출에 의하여 연속적 조업이 가능하며, 유동층 외부에서 압력요동 특성치를 측정하여 층내상태를 모니터링하여 운전이 가능함을 알 수 있었다.

참고문헌

[1] Armor, J.N., The multiple roles for catalysis in the production of H₂. Appl. Catal. A: General, 176, 159~176(1999).

[2] Geldart, D., "The Effect of Particle Size and Size Distribution on the Behaviour of Gas-Fluidised Beds", Powder Tech., Vol. 6, 201-214(1972)

[3] Pis, J. J., *et al.*, "Attrition of Coal Particles in a Fluidized Bed", Powder Tech., Vol. 66, 41-46(1991)

[8] Arena, U., *et al.*, "Evaluation of Attrition Rate Constants of Char Burning in Fluidized Beds by Means of laboratory-Scale Combustors", AIChE J., Vol. 32, 869-871(1986)

[9] Shanlou, P. A., liu, Z. and Yates, J.G., "Hydrodynamic Influences on Particle Breakage in Fluidized Bed", AIChE J., Vol. 45, 809-817(1991)

[10] Bendart, J. S. and Piersol, A. G. : "Random Data", John Wiley, New York(1971).

[11] Cooper, G. R. and McGillem, C. D. : "Probabilistic Methods of Signals and System Analysis", Holt, Rinehart and Winston Inc.(1971).

[12] Choudhary, T.V., Sivadinarayana, C., Chusuei, C.C., Klinghoffer, A. and Goodman, D.W., Hydrogen production via Catalytic Decomposition of Methane. J. Catal., 199, 9~18(2001).

[13] Choudhary, V.R., Banerjee, S. and Rajput, A.M., Continuous Production of H₂ at Low Temperature from Methane Decomposition over Ni-Containing Catalyst Followed by Gasification by Steam of the Carbon on the Catalyst in Two Parallel Reactors Operated in Cyclic Manner. J. Catal., 198, 136~141(2001).

[14] Li, Y.D., Chen, J.L., Qin, Y.N. and Chang, L., Simultaneous Production of Hydrogen and Nanocarbon from Decomposition of Methane on a Nickel-Based Catalyst. Energy & Fuels, 14, 1188~1194(2000).

[15] Muradov, N., CO₂-free Production of Hydrogen by Catalytic Pyrolysis of Hydrocarbon Fuel. Energy & Fuels, 12, 41~48(1998).

[16] Shah, N., Panjala, D. and Huffman, G.P., Hydrogen Production by Catalytic Decomposition of Methane. Energy & Fuels, 15, 1528~1534(2001).

[17] Cha, W. S., Hong, S. C., Oh, K. J. and Doh, D. S., "Minimum Fluidization Velocity and Fluidization Characteristics of Binary Particle System", HWAHAK KONGHAK, 30(3), 641-648(1992)

장 현 태(Hyun-Tae Jang)

[정회원]



- 1986년 2월 : 고려대학교 화학공학과(공학사)
- 1991년 8월 : 고려대학교 화학공학과(공학석사)
- 1996년 2월 : 고려대학교 화학공학과(공학박사)
- 1997년 3월 ~ 현재 : 한서대학교 화학공학과 부교수

<관심분야>
흡착, 유동층반응

이 지 윤(Ji-Yun Lee)

[비회원]

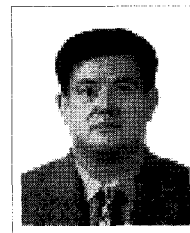


- 2008년 2월 : 한서대학교 화학공학과(공학사)
- 2008년 2월 ~ 현재 : 한서대학교 화학공학과 석사과정

<관심분야>
흡착, 유동층반응

차 왕 석(Wang-Seog Cha)

[정회원]



- 1981년 8월 : 고려대학교 화학공학과(공학사)
- 1985년 2월 : 고려대학교 화학공학과(공학석사)
- 1993년 8월 : 고려대학교 화학공학과(공학박사)
- 1994년 3월 ~ 현재 : 군산대학교 토목환경공학부 교수

<관심분야>
폐기물 가스화 및 열분해