

플라즈마 리액터 및 오존분해 촉매를 이용한 메탄올 및 에탄올로부터 수소발생특성

(Characteristics of Hydrogen Production from Methanol and Ethanol Using Plasma Reactor and Ozone Decomposition Catalyst)

구본국* · 김영춘 · 장문국 · 김종현 · 박재윤 · 한상보**

(Bon-Kook Koo · Yong-Chun Kim · Mun-Gug Jang · Jong-Hyun Kim · Jae-Youn Park · Sang-Bo Han)

Abstract

In this work, the effect of the initial concentration of methanol and ethanol, and the addition of oxygen molecules were discussed to improve the hydrogen generation using non-thermal plasma reactor effectively. In addition, the effect of ozone decomposition catalyst of manganese dioxide and its quantity was investigated. First, hydrogen concentration increased until an initial concentration of about 40,000[ppm] of methanol and thereafter it was saturated. Henceforth, hydrogen concentration decreased with increasing the oxygen percent on the carrier gas of nitrogen about both substances. Related with the effect of catalyst, it increased upto 60[g], but it was not changed largely after that. Consequently, it is confirmed that the hybrid process using plasma process and catalytic surface chemical reaction is a very promising way to increase the efficiency of hydrogen generation as investigated in this work.

Key Words : Catalyst, Ethanol, Hydrogen, Non-thermal Plasma, Methanol, Ozone

1. 서 론

급속한 산업발전 및 경제성장에 따라서 에너지 수요를 충족시키기 위해 많은 양의 석유, 석탄과 같은 화석연료 및 천연가스를 사용해왔다. 하지만 화석연료 매

장량이 유한하며, 지구온난화와 같은 2차적인 환경 문제가 대두되면서 새로운 대체에너지 개발이 불가피하게 되었으며, 태양광, 풍력, 연료전지, 바이오 에너지를 비롯한 다양한 연구가 전 세계적으로 활발히 진행되고 있다.

대체에너지 중에서 수소는 무공해 에너지원으로서 그 가치가 매우 높다. 특히 무한정한 물을 원료로 제조가 가능하며, 사용 후에는 다시 물로 재순환되고, 연소시에도 공해물질이 거의 생성되지 않는다. 그리고 가스나 액체로 쉽게 저장 및 수송이 가능하다.

* 주저자 : 경남대학교 전기공학과 박사과정
** 교신저자 : 경남대학교 전기공학과 교수
Tel : 055-249-2635, Fax : 0505-999-2161
E-mail : hansangbo@kyungnam.ac.kr
접수일자 : 2011년 8월 26일
1차심사 : 2011년 9월 1일
심사완료 : 2011년 9월 21일

이러한 장점으로 인하여 수소는 다양한 산업체, 자동차, 비행기, 연료전지 등 거의 모든 분야에 에너지 원으로 응용될 수 있으며, 미래의 에너지로서 가장 유망한 것으로 평가되고 있다. 하지만 이러한 수소에너지를 상용화하기 위해서는 화석에너지와 같은 1차 에너지보다 저렴한 가격으로 제조되어야 하며, 외부 충격으로부터 보호하기 위해 견고한 수소 저장용기가 제작되어야 한다. 아울러 금속 자체의 수소취성의 문제와 수송 등 해결해야 할 문제점이 많다.

현재 수소를 생산하기 위해서 가장 많이 이용되는 방법은 탄화수소로부터 수소를 생산하는 수증기 개질법(steam reforming process) 및 물의 전기분해법이며, 그 이외 저온열분해법, 광촉매와 바이오를 이용한 수소생산법 등을 들 수 있다[1-6].

최근 많은 연구가 진행되고 있는 비-열평형 플라즈마 기술은 기존 화학적 처리방법에서는 불가능한 새로운 화학반응을 저온에서 짧은 시간에 유도할 수 있다는 특징이 있다. 이러한 장점으로 인하여 유해물질 분해 및 원하는 물질 합성을 위한 다양한 연구들이 진행되고 있다[7-15].

본 연구에서는 높은 전계하에서 가속된 전자가 중성 분자와의 충돌에 의하여 플라즈마를 형성시키고, 형성된 플라즈마 공간내부에 존재하는 다양한 라디칼 및 전자와의 충돌작용에 의하여 메탄올(Methanol, CH_3OH) 및 에탄올(Ethanol, $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$)을 분해시켜 수소 발생량을 극대화하기 위한 초기 농도 및 산소 첨가 영향, 오존분해 촉매인 이산화망간(MnO_2) 촉매량의 영향을 논하였다.

주요한 결과로는 초기농도를 증가시킴에 따른 수소 발생 특성이 메탄올 및 에탄올에 대하여 상이한 결과를 보였으며, 메탄올 및 에탄올 모두 질소에 대한 산소 분율이 증가됨에 따라서 수소 발생량이 감소되었다. 또한 촉매량을 증가시킴에 따라서 60[g]까지 수소 발생량이 증가됨을 보였다. 따라서 본 연구를 통하여 플라즈마 프로세스와 오존분해 촉매를 혼합함에 의하여 수소 발생량이 향상됨을 입증하였다.

2. 실험장치

본 연구에서 사용된 실험장치의 개략도는 그림 1과 같으며, 주요한 구성으로는 플라즈마 리액터, 고전압 발생기, 오존발생기, 촉매관, 가스 분석기, 유기화합물 기화장치 등으로 되어 있다.

플라즈마 리액터는 유전체인 배리어(barrier)를 사용한 무성방전 타입으로서, 고전계에 의해 가속된 전자가 중성기체와의 충돌에 의하여 기체들을 여기 및 전리시키면서 짧은 시간에 여러 가지 화학반응을 효율적으로 발생시키는 저온 플라즈마 리액터의 한 종류이다. 주요한 특징으로는 전극의 한쪽을 유전체인 석영관을 게재시켜 방전이 진진됨에 따라 석영관 표면에 외부전극의 반대 극성 전하들이 축적되도록 되어 있다. 축적된 전하들이 동일공간의 전계를 완화시킴으로서 방전이 스스로 소멸되어 대전류가 흐르는 아크 현상이 방지된다. 즉 방전 상태가 아크로의 전이에 따른 내부 입자들의 가열손실을 최소화함으로써 전력 손실을 최소화할 수 있다[14].

그림 2는 플라즈마 리액터의 구조 및 주요한 규격을 나타낸 것이다. 방전을 용이하게 발생시키기 위하여 내부 전극 표면을 격자형 요철 형태로 기계가공 하였으며, 방전 갭인 유전체 내부와 내부 금속전극과의 거리는 2.5[mm]이다. 고전압을 인가함에 따라서 길이방향으로 수많은 마이크로 방전이 동시에 발생하는 구조로 되어 있다. 또한 유전체가 열에 의해 파괴되는 것을 방지하기 위하여 강제로 냉각수 0.25[L/min]를 순환시켜 사용하였다.

고전압은 대용량 고전압 변압기를 이용하여 1차측 전압을 가변시킴에 의하여 2차측 고전압을 리액터에 인가하여 플라즈마를 발생시켰다.

그리고 액체 상태의 메탄올 또는 에탄올을 기화시켜 가스상 메탄올 또는 에탄올로 변환시키기 위하여 액상의 유기화합물을 마이크로 펌프를 통하여 지속적으로 공급시키고, 동시에 기화점 이상으로 외부 온도제어를 실시하여 캐리어 질소 가스와 함께 플라즈마 리액터로 공급되도록 구성하였다. 이때, 공급되는 메탄올 및 에탄올 농도는 아래의 식 (1)을 이용하여 계산하였다.

$$x [ppm] = \left(\frac{1}{22.4[L]} \times \frac{1[atm]}{273.15 + 25[K]} \right) [mol/L] \quad (1)$$

$$\times (x \times 10^{-6}) \times M [g/mol] \div s.g. [g/ml]$$

여기서 M [g/mol] : 분자량, s.g.[g/ml] : 비중
 (메탄올의 분자량 32.04[g/mol], 비중 0.791[g/ml]
 에탄올의 분자량 46.07[g/mol], 비중 0.789[g/ml])

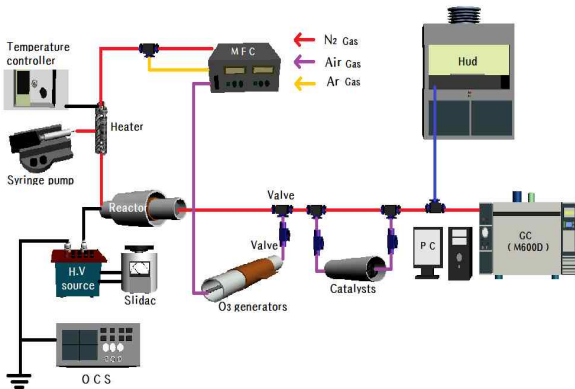


그림 1. 실험장치의 개략도
 Fig. 1. Schematic diagram of the experimental setup

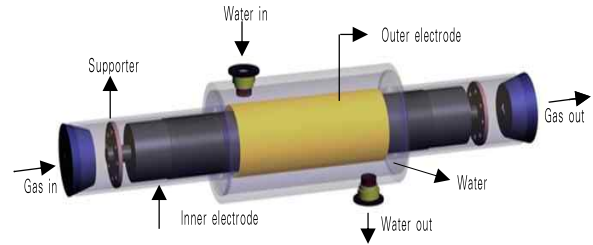
그리고 발생된 수소를 정량·정성 분석하기 위하여 가스 크로마토그래피(Gas Chromatography, GC, M-600D)를 사용하였으며, 3회 반복 측정하여 평균치를 실험 데이터로 활용하였다. 그리고 플라즈마 리액터 후단에 오존발생기 및 촉매관을 두어 촉매량 및 촉매층 통과 유·무에 따른 수소발생량 변화를 조사하였다. 촉매관의 구조 및 주요 사항은 그림 3에 나타내었다.

이때 촉매 표면에 수분이 흡착되어 있으면, 오존 분해효율이 감소되므로, 100[°C] 이상의 고온에서 촉매를 건조시켜 촉매관 내부에 위치시키고, 외부에서 온도제어와 함께 건조한 기체를 2시간 정도 통과시켜 완전히 건조된 상태에서 실험을 진행하였다.

또한 오존 발생기는 그림 4에서와 같이 플라즈마 리액터와 크기 및 재원이 다르지만 동일한 구조로 되어 있으며, 별도의 고전압 전원을 이용하여 효율적으로 오존을 생성시킬 수 있도록 제작하였다.

오존농도는 UV ozone monitor(ER-5000)의 흡입량

이 1.5[L/min]로서 캐리어 가스에 비하여 많으므로 외부기체와 희석하여 측정하였다.

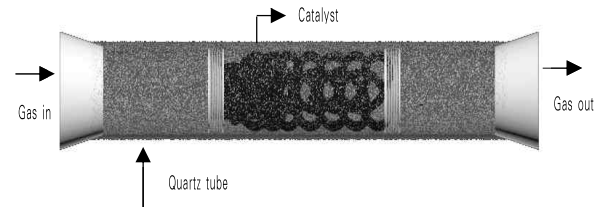


(a) 플라즈마 리액터 구조

	구 분	사 양
1	석영관 총 길이	550[mm]
2	석영관 내경	38[mm]
3	내부 전극 외경	33[mm]
4	외부 전극 길이	180[mm]

(b) 리액터 사양

그림 2. 플라즈마 리액터의 구조 및 사양
 Fig. 2. Structure and specification of plasma reactor

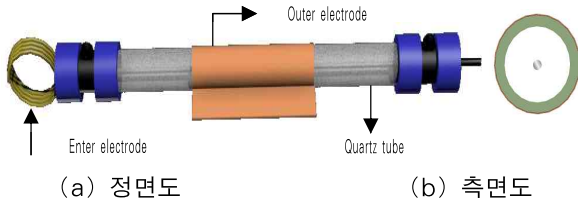


(a) 촉매관의 구조

	구 분	사 양
1	리액터 길이	350[mm]
2	내경/외경	29.5 / 34[mm]
3	촉매의 양	30, 60, 120[g]
4	촉매입자 크기	1~3[mm]

(b) 주요 사양

그림 3. 촉매관의 구조와 주요 사양
 Fig. 3. Structure and specification of catalyst reactor



	구 분	사 양
1	석영관 총 길이	190[mm]
2	석영관 내경	8[mm]
3	내부 전극 외경	1[mm]
4	외부 전극 길이	120[mm]

(c) 주요 사양

그림 4. 오존 발생기의 구조 및 주요 사양
Fig. 4. Structure and specification of ozone generation reactor

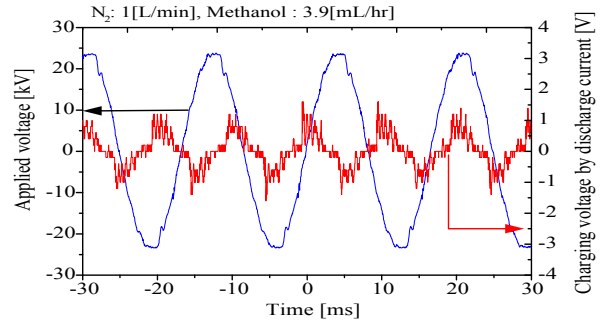
2.1 플라즈마 리액터의 방전특성

그림 5는 플라즈마 리액터의 방전특성을 나타낸 것이다. 그림 5 (a)는 리액터의 외부전극과 접지 사이에 연결된 R-C 병렬회로의 콘덴서 양단전압과 인가전압의 관계를 나타낸 것으로서, 콘덴서 양단전압은 매우 빠른 마이크로 방전들이 리액터 길이 방향으로 발생됨에 따라서 콘덴서에 충전된 전압을 의미한다.

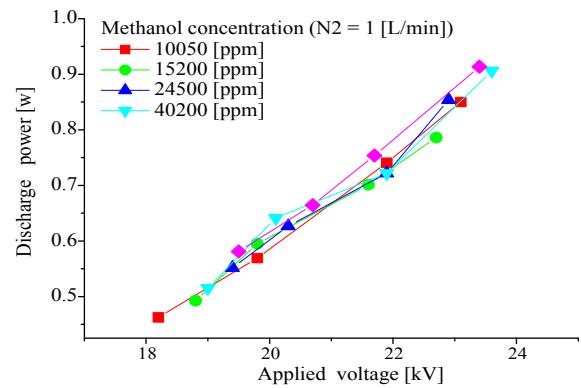
또한 그림 5 (b)는 인가전압에 따른 방전전력의 변화를 나타낸 것으로서, 방전전력은 리사주 도형법 (Lissajous Figure Method)에 의하여 산출하였다 [14-15]. 인가전압을 증가시키에 따라서 방전전력이 증가되며, 메탄올 농도에 따라서 약간의 차이만 있을 뿐 방전전력이 거의 비슷함을 알 수 있다.

2.2 오존 발생기의 방전특성

배리어 방전 리액터는 오존을 효율적으로 발생시킬 수 있는 비-열평형 플라즈마의 대표적 방전 리액터이다. 외부 전계에 의해 가속된 전자가 산소분자와의 충돌에 의해 산소 원자 라디칼(O)이 생성되고, 이러한 산소원자 라디칼은 식 (2)~식 (5)의 여러 반응들을 통하여 오존을 생성시킨다[16].



(a) 인가전압 및 콘덴서 충전전압 특성

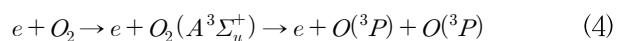
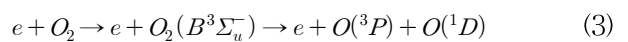
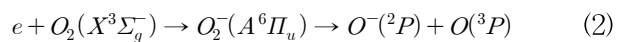


(b) 인가전압에 따른 방전전력 변화

그림 5. 플라즈마 리액터의 방전특성 및 인가전압에 따른 방전전력의 변화
Fig. 5. Discharge characteristics and the variation of discharge power on the applied voltage using plasma reactor

일반적으로 방전전력이 낮아서 리액터가 과열되지 않는 범위에서는 오존 발생량이 선형성을 보인다[17]. 그림 6은 오존발생기의 인가전압과 방전전력과의 상관관계를 보인 것으로서, 방전특성은 그림 5의 플라즈마 리액터와 유사한 배리어 방전형태로서 비슷한 경향을 보였지만, 방전전력은 플라즈마 리액터와 비교하여 약 1/3 정도로 낮음을 알 수 있다.

(1 단계) 산소 분자의 전자충돌에 의한 분해과정



(2 단계) 제 3체 충돌반응에 의한 오존 생성반응



여기서 M은 오존을 생성하는 방향으로 화학반응을 도와주는 제3의 물질을 의미한다.

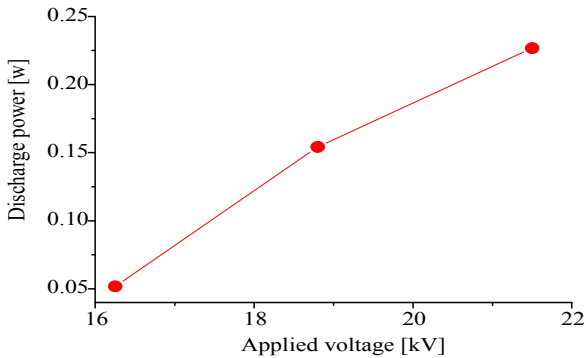


그림 6. 오존 발생기의 인가전압에 따른 방전전력의 변화
Fig. 6. The change of the discharge power according to the applied voltage using ozone generation reactor

3. 실험결과

본 절에서는 플라즈마 리액터를 이용하여 메탄올 및 에탄올의 초기농도의 영향, 인가전압의 영향, 산소첨가의 영향을 비롯하여, 메탄올에 있어서 오존발생기와 오존분해 촉매를 병용함에 따른 수소발생 특성을 논하였다.

3.1 초기농도에 따른 수소발생특성

그림 7은 캐리어 가스로서 질소(N₂) 1[L/min]을 일정하게 공급하면서, 메탄올과 에탄올의 초기농도 및 인가전압 변화에 따른 수소 발생량 변화를 보인 것이다.

그림 7 (a)는 메탄올 초기농도를 증가시킴에 따라서 인가전압의 크기에 관계없이 수소발생량이 서서히 증가되면서 초기농도 약 40,000[ppm] 부근에서 포화됨을 보여준다.

이것은 메탄올 초기농도가 증가됨에 따라서 외부전계에 의해 가속된 전자와 메탄올과의 충돌확률이

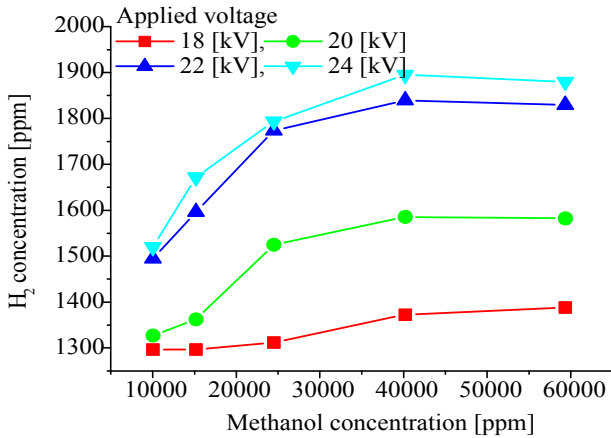
증가됨에 의하여 플라즈마 공간 내부에 수소를 비롯한 다양한 화학종이 생성되면서 수소 발생량이 증가됨을 의미한다. 동일한 인가전압에서 메탄올 초기농도가 증가됨에도 불구하고 포화되는 것은 동일한 방전전력에서는 전자 밀도에 있어서 큰 변화가 수반되지 않으므로 전자와 메탄올과의 충돌확률이 포화상태에 이르렀으며, 플라즈마 공간내부의 여러 화학종과의 화학반응이 포화상태에 이르렀기 때문으로 사료된다.

그리고 동일한 초기농도에서 인가전압 18[kV]에서 22[kV]까지는 점차적으로 수소 발생이 증가되는 경향을 나타내지만, 24[kV]에서는 22[kV]인 경우와 거의 비슷한 경향을 보였다. 이것은 외부전계에 의해 가속된 전자의 평균 운동에너지가 메탄올을 수소 및 여러 화학종으로 분해하는데 한계 상태에 이르렀기 때문으로 판단된다.

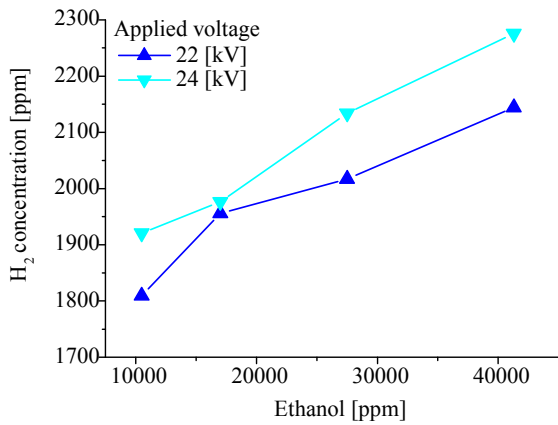
따라서 메탄올을 사용하는 경우에는 인가전압 약 22~24[kV], 초기농도 약 40,000[ppm]이 가장 적절한 것으로 판단된다. 하지만 메탄올이 완전 분해된다면, 약 80,000[ppm]의 수소가 생성되어야 됨에도 불구하고 1,900[ppm]으로 낮기 때문에 플라즈마 내부의 전자 밀도를 향상시키는 새로운 방법을 고안하는 것이 추가적으로 필요하다.

그림 7 (b)는 에탄올을 사용한 경우로서, 마이크로 펌프에 의한 에탄올 공급량을 메탄올에 일치되도록 조절하였지만, 초기농도가 분자량 및 비중차이에 의해서 동일하지 않았다. 한편 에탄올의 경우는 메탄올에서와 같이 초기농도 및 인가전압을 증가시킴에 따라서 포화되는 경향을 나타내지 않고 수소 발생량이 지속적으로 증가됨을 보였다.

이것은 메탄올과 에탄올의 화학구조, 각 원자 간의 결합에너지, 그리고 충돌단면적의 차이에 기인되는 것으로 판단된다. 예를 들어 1개 분자에서 최대 생성될 수 있는 수소분자는 메탄올의 경우는 2개, 에탄올의 경우는 3개까지 생성될 수 있다. 특히 에탄올인 경우에는 분자량이 크므로 충돌단면적이 상대적으로 증가되어 전자와의 충돌확률이 증가된다. 이에 따라 동일한 인가전압에서도 다량의 수소가 생성될 것으로 사료된다.



(a) 메탄올을 사용한 경우



(b) 에탄올을 사용한 경우

그림 7. 메탄올과 에탄올의 초기농도 및 인가전압에 따른 수소발생특성

Fig. 7. Characteristics of hydrogen generation depending on the initial concentration of methanol and ethanol and the applied voltage

3.2 산소 첨가에 따른 수소발생특성

본 절에서는 기화된 메탄올 또는 에탄올의 캐리어 가스인 질소에 추가적으로 에어(N₂: O₂=80:20)를 혼합시켜 전체 유량을 1[L/min]로 일정하게 조정하였을 때의 수소발생 특성을 논하였다. 특히 에어 중에는 산소 분자를 포함하고 있어서 별도의 오존발생기를 사용하지 않아도 플라즈마 리액터 내에서 오존을 생성시킬 수 있으므로 촉매와 화학반응을 유발시킬 수 있

다. 또한 질소분자로부터의 다양한 라디칼 이외에도 산소분자로부터 여기 분자 및 산소원자들이 생성되므로 수소 발생 효율을 증진시킬 수 있을 것으로 기대하였다.

그러나 그림 8 (b)에 있어서 질소에 대한 산소분율이 증가됨에 따라서 오히려 수소 발생량이 감소되다가 포화되는 경향을 보였다.

전계에 의해 가속된 전자가 산소분자와의 충돌에 의하여 새로운 중간 화학종(A)이 생성되고, 생성된 수소 원자들이 중간화학종(A)과 화학반응을 통하여 수소가 아닌 다른 화학종(B)으로 변환되기 때문으로 사료된다.

특히 에어만을 공급한 경우에 있어서는 수소는 전혀 생성되지 않았으며, 오히려 관로 상에 물이 맺히는 현상이 있었다. 즉 플라즈마 내부에서 메탄올 분해에 따라 생성되는 수소원자와 산소원자가 반응하여 식 (6), (7)에서와 같이 물이 형성되는 것으로 사료된다.

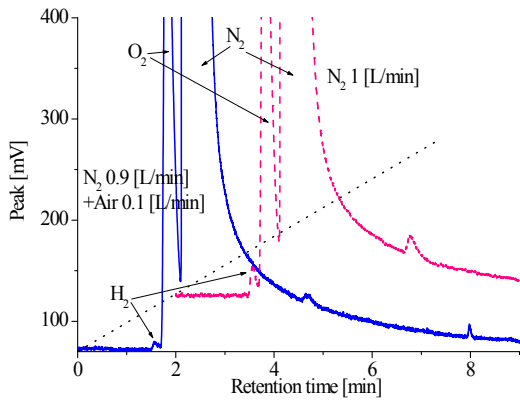


그림 8 (c)는 메탄올과 유사한 농도의 에탄올을 사용한 경우로서, 산소분율이 증가됨에 따라서 산소가 없는 경우보다 오히려 수소가 감소됨을 알 수 있다. 이는 메탄올인 경우와 유사한 화학반응이 유발되어 감소되는 것으로 사료된다.

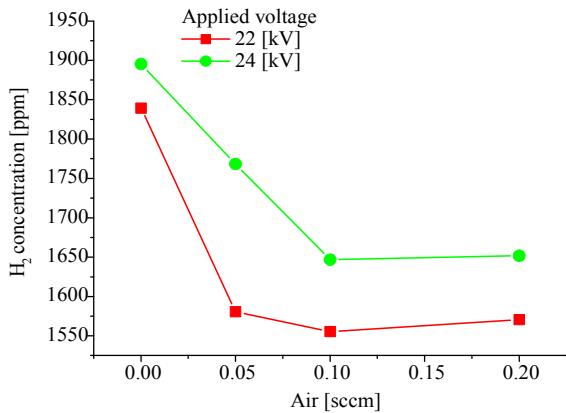
3.3 오존발생기와 촉매 병용에 따른 수소 발생특성

본 절에서는 플라즈마 리액터 후단에 오존발생기 및 이산화망간(MnO₂) 촉매단을 설치하여 오존 공급에 따른 촉매 표면에서의 오존 분해반응에 의해 생성된 새로운 화학종을 이용하여, 플라즈마 리액터로부터 분해되지 않은 메탄올 및 중간 생성물들을 추가적으로 분해시킴에 의하여 수소 발생효율을 향상시키기 위한 연구결과들을 논하였다.

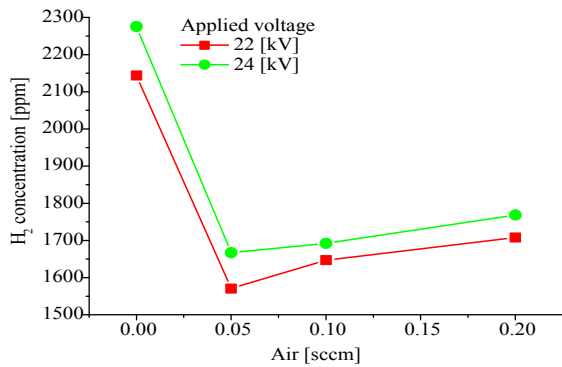
촉매의 양을 30[g], 60[g], 120[g]으로 증가시킴에 따



(a) 에어첨가에 따른 GC 측정 결과



(b) 메탄올을 사용한 경우(초기농도: 40,000(ppm))



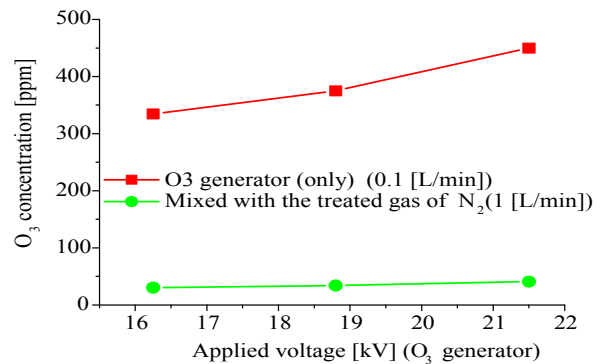
(c) 에탄올을 사용한 경우(초기농도: 41,000(ppm))

그림 8. 질소와 에어 혼합비율에 따른 메탄올 및 에탄올로부터 수소발생특성
Fig. 8. Characteristics of hydrogen generation from methanol and ethanol according to the ratio of nitrogen and air

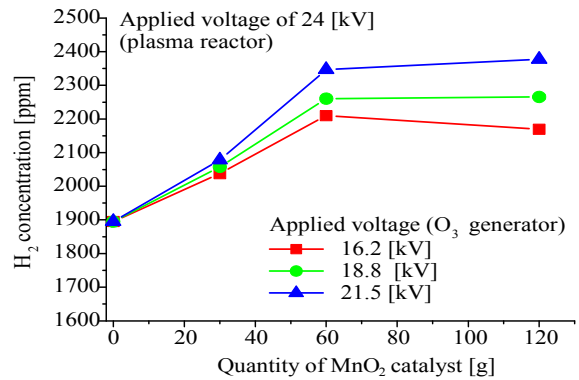
라서 수소 농도가 일정한 상태에 이르기까지 2시간 이상 실험을 진행하였으며, 포화 상태에서의 수소 발생량을 그림 9와 같이 나타내었다.

그림 9 (a)는 오존발생기 인가전압 변화에 따른 오존 농도의 변화를 보인 것으로서, 오존 발생기에 에어 0.1[L/min] 만을 공급한 경우에는 인가전압 21.5[kV]에서 약 450[ppm]까지 오존이 생성되었다. 또한 플라즈마 리액터에서 1차 처리된 기체 1[L/min]와 혼합시킴에 의하여 촉매단 통과 이전에 40[ppm]으로 오존농도가 감소되었다.

그림 9 (b)는 촉매량 및 오존발생기의 인가전압 변



(a) 희석 전후의 인가전압에 따른 오존농도 변화



(b) 촉매량 및 오존 농도에 따른 메탄올로부터 수소발생특성(초기농도: 40,000(ppm))

그림 9. 오존발생기의 오존농도 변화 및 촉매량에 따른 메탄올로부터 수소 발생특성
Fig. 9. Characteristics of hydrogen generation from methanol according to the quantity of catalysts and the change of ozone concentration using ozone generator

화에 따른 수소발생 특성을 보인 것으로서, 촉매량이 60[g]까지 증가됨에 따라서 수소 발생량이 증가되고, 그 이후에는 포화되는 경향을 보였다.

이것은 촉매량 60[g]까지 오존 분해가 활발히 증가하여 새로운 화학반응이 발생되다가, 촉매량이 증가됨에도 불구하고 공급되는 오존농도에 있어서 큰 변화가 없으므로 촉매표면에서 생성된 산소라디칼의 농도가 포화되어 화학반응이 일정하게 이르렀기 때문으로 판단된다.

따라서 오존이 촉매표면에서 분해됨에 의하여 생성되는 산소원자 라디칼로서 $O(^1D)$, $O(^3P)$, O^- 및 O^{2-} 등의 화학종들이 고려되며, 이러한 산소 라디칼에 의하여 플라즈마 리액터에서 미분해된 C-C 결합 및 C-H 결합이 추가로 분해되어 수소 발생량이 증가되는 것으로 사료된다[17].

4. 결 론

본 연구에서는 플라즈마 리액터를 이용하여 수소를 효율적으로 발생시키기 위하여 메탄올 및 에탄올의 초기농도의 영향, 인가전압의 영향, 산소첨가의 영향을 비롯하여, 오존분해 촉매의 병용 효과에 대하여 논하였다. 주요한 연구결과는 다음과 같다.

- (1) 플라즈마 리액터만을 이용하여 메탄올로부터 수소를 발생시키는 경우에 있어서, 메탄올 초기농도를 증가시키에 따라서 인가전압의 크기에 관계없이 수소발생량이 서서히 증가되면서 초기농도 약 40,000[ppm] 부근에서 포화됨을 보였다. 메탄올을 사용하는 경우에는 인가전압 약 22~24[kV], 초기농도 약 40,000[ppm]이 가장 적절한 것으로 도출되었다.
- (2) 에탄올의 경우는 초기농도 및 인가전압을 증가시키에 따라서 포화되는 경향을 나타내지 않고 수소 발생량이 지속적으로 증가됨을 보였다.
- (3) 메탄올 및 에탄올 모두가 질소에 대한 산소분율이 증가됨에 따라서 수소 발생량이 감소되는 경향을 보였다.
- (4) 촉매량을 증가시키에 따른 수소발생 특성에 있어서, 촉매량 60[g]까지 오존 분해가 활발히 증

가되어 새로운 화학반응이 생성됨을 알 수 있으며, 일정량 이상으로 촉매량이 증가됨에도 불구하고 수소농도가 포화되는 것은 촉매표면 산소라디칼의 농도가 포화에 이르렀기 때문으로 판단된다.

감사의 글

이 연구결과는 2011학년도 경남대학교 학술진흥연구비 지원에 의하여 이루어졌음.

References

- [1] O. Aubry, C. Met, A. Khacef, J.M. Cormier, "On the use of a non-thermal plasma reactor for ethanol steam reforming", Chem. Eng. Journal, Vol. 106, No. 3, 241-247, 2005.
- [2] C. Wu, Q. Huang, M. Sui, Y. Yan, F. Wang, "Hydrogen production via catalytic steam reforming of fast pyrolysis bio-oil in a two-stage fixed bed reactor system", Fuel Process. Tech., Vol. 89, No. 12, 1306-1316, 2008.
- [3] Jeppe Rasmussen, Roger Johansson, Martin Møller, Claus Hviid Christensen, "Steam reforming of technical bioethanol for hydrogen production", J. Hydrogen Energy, Vol. 33, No. 17, 4547-4554, 2008.
- [4] Weijie Cai, Fagen Wang, Andre van Veen, Claude Descorme, Yves Schuurman, Wenjie Shen, and Claude Mirodatos, "Hydrogen production from ethanol steam reforming in a micro-channel reactor", J. Hydrogen Energy, Vol. 35, No. 3, 1152-1159, 2010.
- [5] Hidetoshi Sekiguchi, Yoshihiro Mori, "Steam plasma reforming using microwave discharge", Thin Solid Films, Vol. 435, No. 1-2, 44-48, 2003.
- [6] T. Paulmier, L. Fulcheri, "Use of non-thermal plasma for hydrocarbon reforming", Chem. Eng. Journal, Vol. 106, No. 1, 59-71, 2005.
- [7] A. Kulcke, B. Blackmon, W.B. Champman, I.K.Kim, and D.J. Nesbitt, "Time-resolved O3 chemical chain reaction kinetics via high-resolution IR laser absorption methods", J. Phys. Chem. A, Vol. 102 (1998) 1965-1972.
- [8] Sang-Bo Han and Tetsuji Oda, "Decomposition mechanism of trichloroethylene based on by-product distribution in the hybrid barrier discharge plasma process", Plasma Sources Sci. Technol., Vol. 16 (2007) 413-421.
- [9] R. Rudolph, K-P. Franke, and H. Miessner, "Concentration Dependence of VOC decomposition by Dielectric Barrier Discharges", Plas. Chem. And Plas. Process., Vol. 22, No. 3 (2002) 401-412.
- [10] Atsushi Ogata, Daisuke Ito, Koich Mizuno, "Effect of coexisting components on aromatic decomposition in a

packed-bed plasma reactor”, Appl. Catal. A, General 236 (2002) 9-15.

[11] V. Demidiouk, S.I. Moon, J. O. Chae, “Toluene and butyl acetate removal from air by plasma-catalytic system”, Catalysis communication 4 (2003) 51-56.

[12] 井關 昇, “오존나이지에 있어서 오존 생성기구와 금후의 과제” 정전기학회지, 7, 3 (1983) 142-149.

[13] Toshiaki Yamamoto, “VOC decomposition by nonthermal plasma processing - A new approach”, J. electrost., 42 (1997) 227-238.

[14] I. Nagao, M. Nishida, K. Yukimura, S. Kambara, T. Maruyama, “NOx removal using nitrogen gas activated by dielectric barrier discharge at atmospheric pressure”, Vacuum, Vol. 65 (2002) 481-487.

[15] Zoran Falkenstein and John J Coogan, “Microdischarge behaviour in the silent discharge of nitrogen-oxygen and water-air mixtures”, J. Phys. D:Appl. Phys., Vol. 30 (1997) 817-825.

[16] B. Eliasson, M. Hirth and U. Kogelschatz, “Ozone synthesis from oxygen in dielectric barrier discharges”, J. Phys. D:Appl. Phys., Vol. 20 (1987) 1421-1437.

[17] 한상보, “플라즈마 프로세스 및 촉매 표면화학반응에 의한 유기화합물 분해효율 향상에 대한연구”, 대한전기학회, Vol. 59, No. 5, 932-938, 2010.

◇ 저자소개 ◇



구본국 (具本國)
 1958년 7월 3일생. 2005년 경남대학교 (전기공학) 졸업(석사). 현재 동 대학원 (전기공학) 박사과정. 현재 (주)대경 에너지 대표이사.
 E-mail : bonkook1@hanmail.net



김영춘 (金永春)
 1965년 4월 17일생. 1992년 경남대학교 (전기공학) 졸업. 1994년 경남대학교 (전기공학) 졸업(석사). 현재 동 대학원 (전기공학) 박사과정. 1984년~현재 한국 전력공사 근무.
 E-mail : yungchun@kepeco.co.kr



장문국 (張文國)
 1959년 10월 1일생. 1997년 진주산업대학교 (기계공학) 졸업. 1999년 동의대학교 (전기전자공학) 졸업(석사). 현재 경남대학교 대학원 첨단공학과 박사과정. 한국 폴리텍 항공대학 항공전기과 교수.
 E-mail : mungug@hanmail.net



김중현 (金鍾賢)
 1985년 6월 9일생. 현재 경남대학교 전기 공학과 재학생.
 E-mail : kimking8380@gmail.com



박재윤 (朴在潤)
 1960년 4월 15일생. 1986년 경남대학교 (전기공학) 졸업. 1988년 인하대학교 (전기공학) 졸업(석사). 1991년 안하대학교 (전기공학) 졸업(박사). 현재 경남대학교 전기공학과 교수.
 E-mail : jypark@kyungnam.ac.kr



한상보 (韓尙甫)
 1972년 9월 22일생. 1998년 경남대학교 (전기공학) 졸업. 2000년 동 대학원 (전기공학) 졸업(석사). 2004년 동경대학교 (전자공학) 졸업(박사). 현재 경남대학교 전기공학과 교수.
 E-mail : hansangbo@kyungnam.ac.kr