

# 고주파유도결합플라즈마 반응기에서 물로부터 수소생성효율을 높이기 위한 공정변수에 대한 연구

권성구\*<sup>†</sup>, 정용호\*\*

\*군산대학교 신소재공학과, \*\*국가핵융합연구소

## Study on Process Parameters for Effective H<sub>2</sub> Production from H<sub>2</sub>O in High Frequency Inductively Coupled Plasma Reactor

SUNGKU KWON\*<sup>†</sup>, YONGHO JUNG\*\*

*\*Department of Materials Science and Engineering, Kunsan National Univ. 1170 Univ., Ave. Gunsan, Jeonbuk 573-701, Korea*

*\*\*National Fusion Research Institute, 113 Gwahangno, Yuseong-Gu, Daejeon 305-333, Korea*

### ABSTRACT

The effect of process parameters on H<sub>2</sub> production from water vapor excited by HF ICP has been qualitatively examined for the first time. With the increase of ICP power, characteristics of H<sub>2</sub> production from H<sub>2</sub>O dissociation in plasma was divided into 3 regions according to both reaction mechanism and energy efficiency. At the edge of region (II) in the range of middle ICP power, energy effective hydrogen production from H<sub>2</sub>O plasma can be achieved. Furthermore, within the region (II) power condition, heating of substrate up to 500°C shows additional increase of 70~80% in H<sub>2</sub> production compared to H<sub>2</sub>O plasma without substrate heating. This study have shown that combination of optimal plasma power (region II) and wall heating (around 500°C) is one of effective ways for H<sub>2</sub> production from H<sub>2</sub>O.

**KEY WORDS** : Hydrogen production(수소생산), ICP reactor(유도결합플라즈마반응기), Water dissociation(물분해), Process parameters study(공정변수연구), Plasma(플라즈마)

### 1. 서 론

화석에너지를 기반으로 하는 현대문명은 화석자원의 고갈과 환경오염 및 온실가스의 배출에 따른 기후변화로 심각한 위기에 처해있다. 이를 해결하

기 위해서는 자원고갈의 위험이 없고, 환경오염원의 배출이 없으며, 지역적으로 편재되지 않은 새로운 대체에너지의 확보가 필수적이다. 수소는 다양한 기술과 원료로부터 생산이 가능하다. 특히 무한정한 자원인 물을 원료로 사용할 수 있으며, 사용 후에는 다시 물로 재순환되기 때문에 자원고갈의 위험이 없으며, 저장에 따른 손실이 없고, 수송이 용

<sup>†</sup>Corresponding author : skkwon@kunsan.ac.kr

[ 접수일 : 2011.3.31 수정일 : 2011.4.19 게재확정일 : 2011.4.22 ]

이하, 높은 전환효율의 연료전지를 이용하여 전기로 전환이 가능한 친환경적인 에너지원이다. 또한 기존의 화석연료기반의 인프라와 가장 잘 부합되는 연료이기 때문에, 향후 화석연료를 대체할 수 있는 에너지 자원으로 큰 주목을 받고 있다. 따라서, 선진각국은 친환경적인 수소생성과 관련된 핵심원천기술의 확보를 위하여 연구에 진력하고 있다.

현재 상용화 되어있는 수소 생산기술은 화석연료의 개질을 통한 수소생산<sup>1,2)</sup>과 석유정제와 석유화학 산업에서 발생하는 부산물을 통한 생산이 주를 이루며, 전체 생산량의 약 95%를 차지하나, 순도가 낮고, 원료를 화석연료에 의존하며, 생산과정에서 온실가스가 배출되는 단점을 가지고 있다. 장기적으로는 환경부하를 유발하지 않고, 화석연료에 의존하지 않는 수소제조방법의 개발이 바람직하다. 이러한 방법으로는 청정하고, 에너지 효율이 높은 물의 전기분해를 통한 수소제조기술이 적합하기 때문에 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 현재 이 방법의 에너지 변환효율이 약 60~70%로 비교적 높고<sup>3,4)</sup>, 고순도 수소를 제조할 수 있다는 장점에 현재 전체 수소생산의 약 5%를 담당하는 중요한 기술로써, 그 비중이 증가하고 있으나, 여전히 높은 생산비용과 장치 대형화의 어려움, 느린 응답성, 고가의 전극재료의 사용 및 높은 유지관리비용 등의 단점이 해결되어야 하는 문제점으로 남아있다. 이외에도, 응답성이 빠르고, 유지비용이 낮으면서도, 에너지 효율이 높은 새로운 수소제조방법으로 플라즈마를 이용하여 물로부터 수소를 직접 제조하는 방법이 연구되고 있으나<sup>5,6)</sup>, 전기분해 방법에 비하여 에너지 효율이 낮은 것이 단점이다. 이를 보완하기 위하여 플라즈마와 촉매를 동시에 사용하여 에너지효율을 높이고자 하는 방법이 활발히 연구되고 있으며, 이와 더불어 촉매의 효율과 내구성 증진을 위한 연구가 진행되고 있다<sup>7-9)</sup>. 또한 H<sub>2</sub>O 플라즈마의 안정성 증진과 기상분해반응 및 수소생성반응의 효율을 높이기 위하여 Ar, He 이나 N<sub>2</sub> 등의 첨가제 가스를 활용하고자 하는 연구도 활발히 이루어지고 있다<sup>8,9)</sup>.

본 연구에서는 플라즈마를 이용하여 물로부터 수

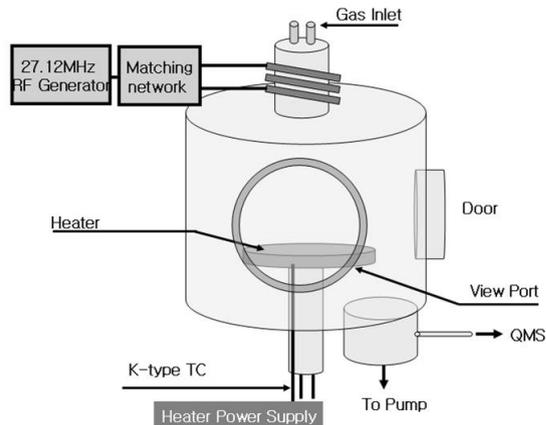


Fig. 1 Schematic diagram of HF-ICP (High Frequency Inductively Coupled Plasma) Reactor for H<sub>2</sub> production from H<sub>2</sub>O

소를 제조하는 기존의 연구에서 상대적으로 연구가 적게 이루어진 새로운 플라즈마 소스로써, 고주파 유도결합플라즈마를 이용한 고밀도 플라즈마의 적용가능성을 실험하고, 각 공정변수에 따른 물분해 거동과 수소생성거동을 조사하여, 에너지 효율적인 수소생성을 위한 공정조건을 도출하고자 한다.

## 2. 실험

### 2.1 실험장치

Fig. 1에는 물로부터 수소를 제조하기 위하여 본 연구실에서 설계·제작한 고주파 유도결합방식의 고밀도플라즈마 실험장치를 개략적으로 나타내었다. 플라즈마 생성부는 길이는 300mm이고, 외경이 38mm이고, 두께가 3mm인 고순도 석영관의 중앙에 유도결합방식으로 고주파를 인가하기 위하여 1/4인치 Copper Tube를 사용하여 3회전된 코일안테나를 제작하여 설치하였으며, 플라즈마 인가 시, 고전류로 인해 안테나가 가열되면 플라즈마 발생효율이 저하되기 때문에 구리관내부로 냉각수를 공급하여 일정한 온도로 유지되도록 냉각장치를 설치하였다. 물로부터 에너지 효율적으로 수소를 제조하기 위해서는 고밀도 플라즈마가 유리한 것으로 조사되었기 때문에, 고밀도플라즈마의 발생에 유리하도록 발생

주파수가 27.12MHz이고, 출력이 600 Watt인 영신 알에프사의 고주파발생기(한국, YSR-03-06MF)를 사용하였으며, 플라즈마 정합은 동사의 AMN-100을 사용하여 자동정합이 가능하도록 하였다. 반응기의 압력을 저압으로 제어하기 위하여, 배기량이 8000L/min인 Alcatel 113(Alcatel, Fr) 건식방식의 대용량 진공펌프를 사용하였다. 반응기의 압력은 MDC사의 butterfly valve를 이용하여 수동으로 조절하였으며, 진공도 측정은 가스 종류의 영향을 받지 않는 capacitance 방식의 Baratron gauge(MKS, USA)를 사용하였다. 물분해 및 수소생성 반응 중, 가스상의 성분분석을 위하여 인피콘(INFICON)사의 HI00M 사극자 질량분석기를 사용하였다. 반응기로부터 반응가스의 채취는 반응기 내에 설치된 1/8인치 SUS316L관을 통하여 차동압력방식으로 반응가스성분을 질량분석기로 유도한 다음, 미량조절 밸브를 통하여 일부 가스를 질량분석기로 유입하여 성분에 사용하고, 나머지 가스는 배기하였다. 질량분석기의 운전압력은  $10^{-7}$  Torr로 유지하였다. 질량분석기에서 이온검출은 고감도 분석이 가능한 electron multiplier 방식을 사용하여 분석하였다.

## 2.2 실험방법

실험에 사용된 물은 ELGA사의 Purelab option-Q 초순수제조기를 사용하여 비저항이  $18\text{M}\Omega\text{-cm}$  이상의 초순수를 사용하였다. Sus316L로 제작한 canister (D: 100mm, H: 250mm)에 약 1000cc의 초순수를 충전한 후에 가열밴드로 canister의 온도를 약  $60^\circ\text{C}$ 로 일정하게 유지하면서 발생한 수증기를 500 sccm 용량의 HT-MFC(High-Temperature Mass Flow Controller)(MC-3102L-TC, Japan)를 사용하여 반응기로 정해진 유량의 수증기를 공급하였다.

실험은 먼저 반응기 안의 불순물을 제거하기 위하여 Ar 가스와 진공을 교대로 실시하여 충분히 퍼지한 후에, MFC를 사용하여 일정한 유량의 수증기를 반응기에 공급하였다. 반응기 압력은 butterfly valve를 조정하여 조절하였다. 이 후에 사극자질량분석기와 연결된 밸브를 열어서 일정시료를 차동압

Table 1 Experimental parameters and range

Parameter	Range	Unit
ICP Power	0 ~ 400	Watt
H2O Flow Rate	50 ~ 150	sccm
Pressure	200 ~ 500	mTorr
Reactor Temp.	RT ~ 500	$^\circ\text{C}$

력방식으로 질량분석기로 유입되도록 조정된 후에 미량조절밸브를 조정하여 사극자 질량분석기의 동작압력을  $10^{-7}$  Torr로 유지하면서 가스분석을 실시하였다. 계속해서 ICP power를 50W 씩 400W까지 증가하면서 같은 실험을 반복한 후에 다시 power를 50W 씩 내리면서 배기가스성분 분석을 실시한 후에, 같은 power 조건에서의 측정값을 비교하여 실험에서 발생하는 오차를 최소화 하였다. 반응기의 분위기를 일정하게 유지하기 위하여 본 실험과 동일한 조건에서 2회 이상의 예비실험을 실시하여 측정값이 일정해지는 시점에서 본 실험을 실시한 결과 실험의 재현성과 결과의 신뢰성을 확보할 수 있었다. 본 실험에 사용된 공정변수와 각 변수의 실험 범위를 Table 1에 정리하여 나타내었다. 수증기의 분해율과 수소생성율은 반응기의 배기부에 설치된 샘플포트를 통해 실시간 추출한 배기가스를 사극자 질량분석기로 분석하여 평가하였다. 배기가스 중에 포함된 각 성분의 정량분석을 위하여 Ar 가스를 5 sccm 첨가하였다. 사극자질량분석기에서 측정된 값은 Ar 가스의 양을 기준으로 보정하여 비교하였으며, 분석된 각각의 분해종들의 측정값들은 질량

Table 2 Correction factor of QMS (QMS manual data)

Factors Species	I (Ionization Yield)	T (Transmission Factor)	S (I×T), (Sensitivity Factor)
H <sub>2</sub> (2)	0.3052	6.2000	1.8922
O (16)	0.9926	3.4000	3.3748
OH (17)	1.0417	3.2000	3.3334
H <sub>2</sub> O (18)	1.0908	3.0000	3.2724
O <sub>2</sub> (32)	1.7782	0.9576	1.7028
Ar (40)	2.1710	0.8736	1.8966

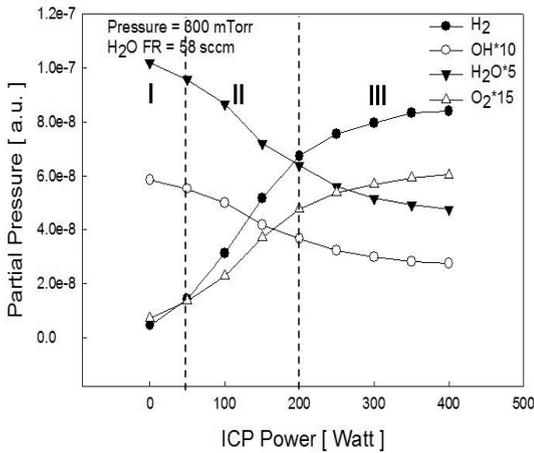


Fig. 2 Partial pressure of water splitted species as a function of ICP power (H<sub>2</sub>O flow rate : 58sccm, Reactor pressure : 300 mTorr, Heater Temperature : 300°C)

분석기의 감도인자를 이용하여 보정하였다. 사극자 질량분석기에서 보정에 사용한 이온화 수율, 투과 인자와 감도인자를 Table 2에 나타내었다.

### 3. 결과 및 토의

#### 3.1 H<sub>2</sub>O Plasma에서 Power의 영향

H<sub>2</sub>O 유량을 58 sccm으로 고정하고, 반응기의 의 압력과 Heater의 온도를 300°C로 유지한 상태에서 유도결합플라즈마의 인가출력을 400 Watts까지 50 Watts 단위로 증가시키면서 플라즈마내에서 분해된 기체성분들을 차압채취방식으로 취하여 사극자 질량분석기를 이용하여 분석한 결과를 Fig. 2에 나타내었다. 인가출력이 증가함에 따라 H<sub>2</sub>O와 OH의 분압이 감소하면서 H<sub>2</sub>와 O<sub>2</sub>의 분압이 증가하는 경향을 나타내는 것으로부터 H<sub>2</sub>O가 플라즈마 내에서 수소와 산소로 효과적으로 분해되는 것을 알 수 있었다. 고정된 유량과 반응기 압력조건에서는 플라즈마 인가 출력이 증가함에 따라 초기영역인 I영역에서는 플라즈마의 생성과 안정화 단계로 물분해와 수소생성이 낮은 상태에 머무르나, II영역에서는 출력이 증가함에 따라 플라즈마가 확대되면서, 물분해와 수소생성이 거의 선형적으로 증가하게 된다.

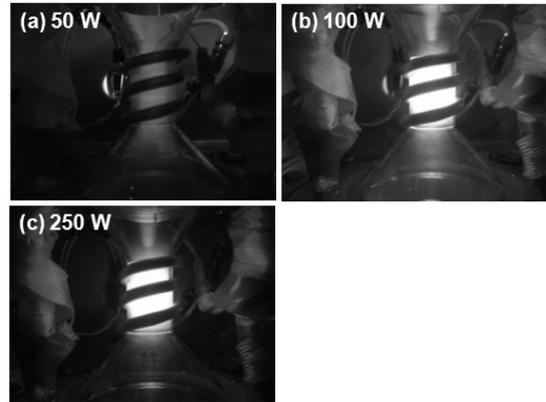


Fig. 3 Photo images of water plasma (H<sub>2</sub>O flow rate : 58sccm, Reactor pressure : 300 mTorr, Heater Temperature : 300°C)

마지막으로 영역 III에서는 추가적인 출력증가에도 물분해와 수소생성이 더 이상 증가하지 않고, 포화되는 영역에 들어가게 되며, 이 영역에서는 추가되는 출력이 빛과 열에너지로 소모되기 때문에 에너지 효율이 오히려 떨어지게 된다. 이 세 영역에 대한 플라즈마 이미지와 플라즈마의 특징을 Fig. 3과 Table 3에 요약하여 나타내었다.

#### 3.2 H<sub>2</sub>O 유량의 영향

반응기로 공급되는 H<sub>2</sub>O 증기의 유량에 따른 수소생성속도 거동을 조사하여 Fig. 4에 나타내었다. 영역 I에서는 H<sub>2</sub>O의 유량에 관계없이 플라즈마의 출력이 증가함에 따라 수소생성량이 증가하는 반응

Table 3 Summary of water plasma characteristics according to defined regions of Fig. 2

	Regional plasma characteristics
Region I	- Low plasma density - Low dissociation yield - Local developed plasma
Region II	- Medium plasma density - Medium dissociation yield - Linearly plasma volume growth
Region III	- High plasma density - High dissociation yield - Fully developed and Glow loss increase

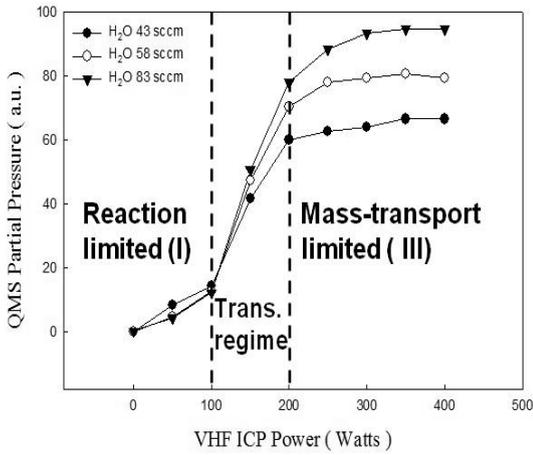


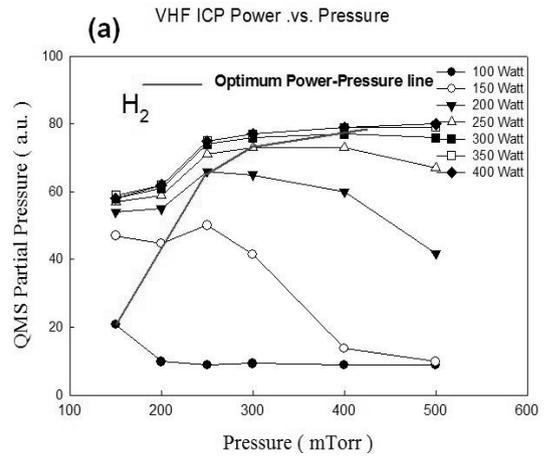
Fig. 4 Partial pressure of H<sub>2</sub> in water plasma as a function of ICP power (H<sub>2</sub>O flow rate : 43~83 sccm, Reactor pressure : 300 mTorr, Heater Temperature : 300°C)

제한영역의 특징을 나타내었다. 이 영역은 공급되는 유량에 비하여 플라즈마 출력이 낮기 때문에 수소생성량은 입력에너지에 비례하는 특성을 나타내지만 플라즈마가 부분적으로 형성되기 때문에 에너지 전달효율이 낮아서 수소생성 효율이 낮은 영역이다.

영역 III은 플라즈마 출력이 충분하기 때문에 유량이 증가하면 수소생성율이 증가하는 물질전달 제한 영역의 특징을 나타내면서 또한 각 유량에서 플라즈마 출력에 대하여 수소생성이 포화되는 특성을 나타내었다. 영역 II에서는 플라즈마가 충분히 발달되어 에너지 전달효율이 높은 반응제한 영역의 특징을 나타내면서 출력이 증가함에 따라 물질전달제한 영역의 특징도 일부 나타나는 영역이다. 이 영역에서는 플라즈마 출력증가에 따른 수소생성의 포화 특성이 나타나지 않기 때문에 인가 플라즈마 에너지대비 수소생성 효율이 가장 높은 영역에 속하는 것으로 판단된다. 따라서, 수소생성량을 높이고 에너지 효율을 높이기 위해서는 영역 II에서 물플라즈마를 발생시키는 것이 유리할 것으로 여겨진다.

### 3.3 공정압력의 영향

플라즈마를 이용하여 물로부터 수소를 제조하는



Optimum Power-Pressure condition

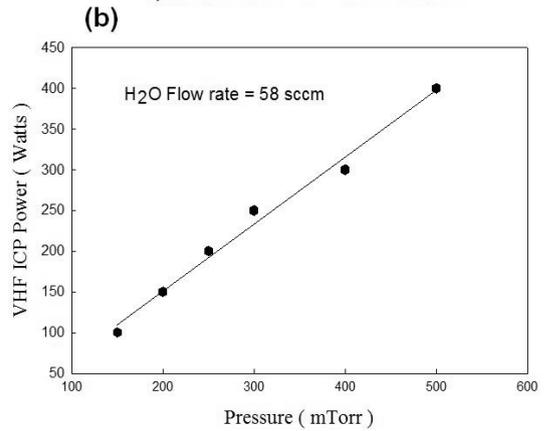


Fig. 5 (a) Partial pressure of H<sub>2</sub> in water plasma and (b) optimum ICP power as a function of process pressure (H<sub>2</sub>O flow rate : 58 sccm, Heater Temperature : 300°C)

공정에서 반응기 압력에 따른 수소 생성 거동을 조사하기 위하여, H<sub>2</sub>O 유량과 Heater 온도를 각각 58 sccm과 300°C로 고정한 후에 반응기의 압력을 150 mTorr에서부터 500 mTorr까지 50 mTorr 단위로 증가시키면서 ICP 파워에 따른 수소 생성 거동을 질량분석기를 사용하여 분석한 후에 이를 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5(a)를 보면 100~250 Watt의 ICP 파워범위에서는 반응기 압력이 증가함에 따라 수소 생성량이 증가하다가 다시 감소하는 거동을 나타내며, 최고 생성압력은 파워와 비례하는 경향을 나타내었다. 이보다 파워가 높은 영역에서는 수소증가

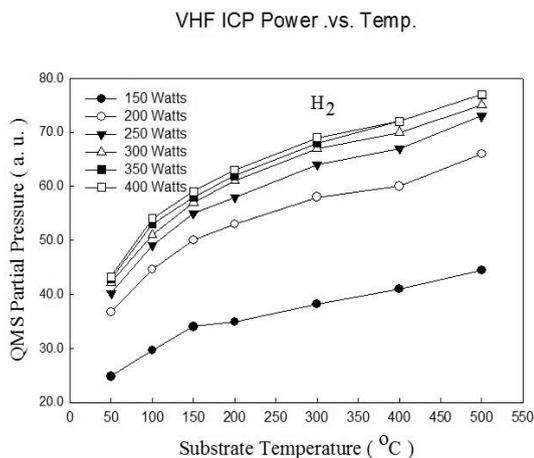


Fig. 6 Partial pressure of H<sub>2</sub> in water plasma as a function of substrate temperature (H<sub>2</sub>O flow rate : 58 sccm, Reactor pressure : 300 mTorr)

가 포화되는 거동을 나타내기 때문에 과잉의 에너지가 열과 빛으로 소모되면서, 수소생성에는 기여하지 않는 것으로 나타났다. Fig. 5(a)에서 각각의 ICP 파워에서 가장 높은 수소생성량을 나타내는 압력을 조사하여 Fig. 5(b)에 나타내었다. Fig. 5(b)는 반응기의 압력이 높아지면, 즉 반응기의 H<sub>2</sub>O 농도가 증가하면 - 더욱 높은 플라즈마 출력에서 수소생성량이 포화됨을 알 수 있으며, 선형관계를 나타내고 있다. 따라서 수소생성량을 높이기 위하여 반응기 압력을 증가할 경우에는 플라즈마 출력을 그에 비례하는 값으로 연동시켜주어야 가장 효율적인 수소 생성이 가능함을 알 수 있었다. 이는 물분자의 농도가 증가하면 각 물분자의 분해에 필요한 에너지가 추가로 소요되기 때문으로 판단되며, 압력이 높아짐에 따라 평균자유경로가 짧아지고, 분해된 활성종간의 충돌 또는 활성종과 중성종간의 충돌로 인한 재결합과 냉각으로 분해효율이 저하되거나 포화되는 것으로 판단된다.

### 3.4 Heater 온도의 영향

물플라즈마의 분해 및 수소생성 효율에 미치는 Heater 온도의 영향을 조사하여 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6에서는 반응기 압력과 유량을 각각 300

mTorr와 58 sccm으로 고정한 상태에서, Heater의 온도를 50°C에서 500°C 까지 50°C간격으로 승온시키면서, 각 온도에서 플라즈마 출력에 따른 수소생성 거동을 사극자 질량분석기로 실험한 결과를 나타낸 결과이다.

고정된 플라즈마 파워에서는 기판온도가 증가함에 따라 수소생성량이 증가하였다. 특히 플라즈마 출력이 100~200 Watts의 영역(Fig. 4의 영역(II))에서는 온도증가에 따른 수소생성효율이 크게 높아지는 것을 확인할 수 있었다. 플라즈마를 인가하지 않고 500°C까지 가열한 경우에는 수소가 전혀 생성되지 않았으나, 플라즈마를 함께 인가한 경우에는 플라즈마만 단독으로 사용하는 경우보다 수소 생성 효율이 최대 1.7~1.8배 까지 크게 개선되었다. 이를 미루어 볼 때, 플라즈마 영역에서는 물분해 반응이 주로 일어나며, 생성된 이온과 라디칼이 수소와 산소가 되는 반응은 기상과 벽면에서 동시에 일어나는 것으로 판단된다. 반응기 벽면의 온도가 낮은 경우에는, 높은 에너지의 활성종이 냉각되어 반응효율이 낮아지는 반면, 벽면의 온도가 높을 경우에는 활성종들의 반응이 벽에서도 활발하게 일어나기 때문에 벽면 온도 증가에 따른 수소생성 효율이 증가하는 것으로 사료된다. 그러나, 250 Watts 이상의 높은 플라즈마 파워에서는 물분해율이 포화되기 때문에 기판온도를 높여도 수소 생성량의 증가가 크게 개선되지 않는 것으로 판단된다. 따라서, 물분해를 통한 수소 생성반응에서 플라즈마 파워와 벽면의 가열이 상승효과를 나타내는 것을 확인할 수 있었으며, 영역 II에서 에너지 효율이 가장 높은 것으로 나타났다.

## 4. 결 론

청정한 수소생성기술로서 고주파 유도결합방식의 플라즈마를 이용하여 물로부터 수소를 제조할 수 있는 공정의 가능성을 확인한 결과 약 50~60%의 물분해율과 높은 수소 생성 효율을 확인할 수 있었으며, 이로부터 플라즈마를 이용한 수소제조공정의 가능성을 확인할 수 있었다.

플라즈마 파워와 수증기 유량에 따른 물분해 및 수소생성거동을 질량분석기를 사용하여 분석한 결과, 플라즈마 파워에 따라 세 개의 영역으로 구분되어지는 특징을 나타내었다. 플라즈마 파워가 100~200W의 중간파워 영역(II)에서는 플라즈마 파워와 유량에 대하여 물분해 및 수소생성율이 선형적인 증가특성을 나타내었으며, 포화특성이 나타나지 않았기 때문에 에너지 효율이 가장 높았다. 특히, 영역(II)의 파워 및 유량조건에서 기판온도를 500°C까지 승온할 경우, 가열하지 않고 플라즈마만 인가한 경우에 비하여 분해 효율이 약 1.7~1.8 배로 크게 향상되었다. HFICP 플라즈마를 사용한 수소제조에서 에너지 효율적인 공정조건은 중간 플라즈마 파워 영역(II)에서 300~500°C의 벽면온도를 인가할 경우인 것으로 나타났다.

## 후 기

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단-신기술융합형 성장동력사업의 지원(과제번호 : 2010-0093708)과 2010년도 정부출연 재원으로 국가핵융합연구소 주요사업에서 지원을 받아 수행된 연구임

## 참 고 문 헌

- 1) T. Kodama, A. Funatoh, T. Shimizu, and Y. Kitayama, "Metal-oxide-catalyzed CO<sub>2</sub> gasification of coal using a solar furnace simulator", *Energy Fuels*, Vol. 14, No. 6, 2000, pp. 1323-1330.
- 2) V. Anikeev, A. Bobrin, J. Ortner, S. Schmidt, K. H. Funken, and N. Kuzin, "Catalytic thermochemical reactor/receiver for solar reforming of natural gas: Design and performance", *Solar Energy*, Vol. 63, No. 2, 1988, pp. 97-104.
- 3) Divisek J., "Water electrolysis in a low and medium temperature regime", in Wendt H (Edi.), "Electrochemical hydrogen technologies - Electrochemical production and combustion of hydrogen", Elsevier, USA, 1990, pp. 137-212.
- 4) B. Gim, J. Kim, "Economic evaluation of domestic photoelectrochemical hydrogen production", *Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society*, Vol. 21, No. 1, 2010, pp. 64-71.
- 5) X. Chen, M. Marquez, J. Rozak, C. Marun, J. Luo, S. L. Suib, Y. Hayashi, and H. Matsumoto, "H<sub>2</sub>O splitting in tubular plasma reactors", *J. Catal.*, Vol. 178, No. 1, 1988, pp. 372-377.
- 6) D. W. Kim, Y. H. Jung, W. I. Choo, S. O. Jang, B. J. Lee, Y. H. Kim, S. H. Lee and S. K. Kwon, "Effect of CH<sub>4</sub> addition to the H<sub>2</sub>O plasma excited by HF ICP for H<sub>2</sub> production", *JKIEEME*, Vol. 22, No. 5, 2009, pp. 448-454.
- 7) X. Chen, S. L. Suib, Y. Hayashi, and H. Matsumoto, "H<sub>2</sub>O splitting in tubular PACT (Plasma and catalyst integrated technologies) Reactors", *J. Catal.*, Vol. 201, No. 2, 2001, pp. 198-205.
- 8) S. L. Suib, S. L. Brock, M. Marquez, J. Luo, H. Matsumoto, and Y. Hayashi, "Efficient catalytic plasma activation of CO<sub>2</sub>, NO, and H<sub>2</sub>O", *J. Phys. Chem. B*, Vol. 102, No. 48, 1998, pp. 9661-9666.
- 9) J. Luo, S. L. Suib, Y. Hayashi, and H. Matsumoto, "Emission spectroscopic studies of plasma-induced NO decomposition and water splitting", *J. Phys. Chem. A*, Vol. 103, No. 31, 1999, pp. 6151-6161.