신장 회전아크 반응기에서 방전모드에 따른 암모니아 분해특성

Characteristics of NH₃ Decomposition according to Discharge Mode in Elongated Rotating Arc Reactor

김관태 · 강희석 · 이대훈^{*} · 조성권 · 송영훈 · 김인명^{*}
 Kim Kwan-Tae · Kang Hee Seok · Lee Dae Hoon^{*} · Jo Sung Kwon
 Song Young-Hoon · Kim In Myoung^{*}

한국기계연구원 플라즈마연구실 · *에너콘스테크

Department of Plasma Engineering, Korea Institute of Machinery & Materials · *Enercons Tech. Ltd.

(2013년 1월 30일 접수, 2013년 5월 9일 채택)

Abstract : An attempt has been made to optimize elongated rotating arc plasma NH₃ scrubber. Among diverse semiconductor processes, diffusion and implantation process inevitably produce NH₃ as byproduct and efficient dry process for the decomposition of NH₃ is required. Plasma process does not produce NO_x that is commonly produced in combustion process and there is no problem of deactivation, usually experienced in catalyst process. However, plasma process uses electrical energy and needs to be optimized to achieve feasibility of application. In this work, mode control of rotating arc is presented as tentative solution for the possible optimization of the process. Based on existing rotating arc, scale-up and following mode mapping was tried. Proposed reactor design was evaluated in the NH₃ decomposition process and revealed that optimization scheme is at hand. In the experiment of full scale scrubber including heat exchanger, the process gave more stable and efficient process of NH₃ decomposition.

Key Words : Elongated Rotating Arc, NH₃, Specific Energy Density, NO_x

요약 : 암모니아 처리용 플라즈마 스크러버 공정 최적화 연구를 수행하였다. 여러 반도체공정 중 확산과 이온주입공정에서는 불가피하게 부산물로서 암모니아가 배출되며, 따라서 효율적인 건식처리공정기술이 필요하다. 플라즈마 처리공정은 연소 공정에서 배출되는 NO_x가 발생하지 않으며, 촉매공정에서 나타나는 비활성문제가 없다. 그러나 전기에너지를 사용하기 때문에 실제 적용을 위한 최적화 연구가 필요하며, 본 연구에서는 공정 최적화를 위한 해결책으로 회전아크 반응기의 모드제어에 대한 연구를 수행하였다. 기존 회전아크 반응기에 대한 스케일 업 및 그에 대한 모드 매핑을 수행하였다. 설계 반응기를 이용하여 암모니아 분해특성을 평가하였고, 최적화 설계가 가능한 것으로 나타났다. 또한 열교환기를 포함한 전체 스케일의 스크러버 실험에서 암모니아 분해공정이 보다 안정적이고, 효율적인 것으로 나타났다.

주제어 : 신장 회전아크, 암모니아, 비에너지 밀도, 질소산화물

1. 서론

반도체/디스플레이 산업은 부존자원이 거의 없는 우리의 여건에서 보면 고부가가치산업으로서의 최적의 분야로 꼽을 수 있다. 특히 반도체산업은 단일산업으로 유일하게 검증된 고부가가치산업이며, 디스플레이산업 또한 전자와 기계 등 융복합산업의 진전과 기술의 발전에 힘입어 미래의 국내외 시장에서 지속적인 시장창출 가능성이 큰 산업이라 할 수 있다.

그러나 반도체 제조공정에서는 미세가공을 위해 확산(diffusion), 박막증착(thin film deposition), 사진(lithography), 에칭(etching)공정 등에 Table 1에 나타난 바와 같이 여러 종류의 독성 가스나 화학약품 등을 다량으로 사용하고 있어, 각각의 공정에서 배출되는 유해물질들로 인해 지구온난화 및 환경오염에 상당한 영향을 미치고 있다.

이러한 반도체 제조 및 세정공정에서 사용되는 독성가스 및 케미컬(chemical)들은 폭발성, 반응성, 부식성 및 독성 등의 특성을 가지고 있어 공정 배기계통에서 즉시 처리되어야 하며, 이러한 이유로 반도체 제조라인에서는 처리장치로 가

Table 1. Many different kinds of compounds and chemicals used in the various semiconductor manufacturing processes

Process	Main processes	Environmental issues
Cleaning & CMP	• Wet each, Wafer cleaning • CMP, SOG	VOCs (IPA, acetone) Acids, Solvents, Wastewater CMP slurry, Metal slurry
Lithography & etch	• P/R deposition, Exposure, Development, oxide, Nitride, Poly, Metal • Etching	VOCs (P/R, HMDS, thinner, developer) PFCs, Chloride (Cl ₂ , BCl ₃)
Diffusion & implantation	• Thermal oxide • Anneal ion doping	Hydride (NH ₃ , PH ₃ , AsH ₃)
CVD & metallization	• LP CVD, PE CVD, • CVD (Metal), PVD	PFCs, Silane, Fluoride copper ligand
Packaging	• Soldering • Molding	Solder solution, Waste acid, EMC

스 스크러버 등을 사용하고 있다. 반도체 제조공정에서의 가스 스크러버는 Fig. 1에 나타난 바와 같이 설치위치에 따라 저압공정과 상압공정으로 나눌 수 있는데, 상압기술의

^{*} Corresponding author E-mail: dhlee@kimm.re.kr Tel: 042-868-7406 Fax: 042-868-7284

Fig. 1. Reduction technologies for various compounds emission from the semiconductor manufacturing process.

경우에는 dry pump 후단 배기라인(End of Pipe)에 설치가 가능하므로 여러 대의 공정챔버에서 배출되는 가스들을 한 곳으로 모아 대용량 처리가 가능한 기술이다.¹⁾

한편, 앞에서 언급한 반도체 제조공정 중 화학기상증착 (Chemical Vapor Deposition, CVD) 공정에서는 절연 막(film) 혹은 전도성 박막을 형성하기 위해 식 (1)과 같이 실란(SiH₄), 암모니아(NH₃) 등을 사용하고 있다. 이들 공정에서 배출되는 SiH₄, NH₃ 등의 배출 부산물은 폭발가능성과 독성 및 부식성 등으로 인해 안전하게 처리해서 배출해야 한다.

이들 부산물을 처리하는 기술로는 열분해 공정, 촉매법 및 플라즈마를 이용한 공정 등이 널리 알려져 있는데, 열분해 기술은 고온의 로에서 열적분해를 도모하고, 촉매법의 경우는 촉매반응을 통해 로보다 상대적으로 저온조건에서 화학적 처리를 수행하며, 플라즈마 처리법은 플라즈마에 의해 발생되는 고온, 고반응성 환경에서 처리하게 된다.

이들 다양한 처리법 중 촉매법은 촉매 피독 및 오염에 따른 활성저하나 높은 촉매비용이 단점으로 알려져 있으며,²⁾ 열분해기술은 대용량의 가스를 처리할 경우에 유리한 반면, 질소산화물(NO_x)과 같은 반응부산물의 발생이 단점으로 지적되고 있다.³⁾ 반면 플라즈마 열분해는 높은 처리효율에 NO_x와 같은 부산물발생이 없으며, 다양한 배기가스를 처리하고 용량의 확장 및 적용처에 대한 대응이 용이하다는 장점 등으로 인하여, 적용가능성이 높은 기술로 평가되고 있다.¹⁾

한편, 플라즈마는 다양한 방식으로 발생이 가능한데 열분해에 적용할 수 있는 여러 종류의 플라즈마 처리기술 가운데, RF (Radio Frequency)와 microwave plasma 기술의 경우 높은 처리율을 보이는 반면, 처리 용량이 늘어날 경우 플라즈마의 발생이 어려워지는 한계가 있는 것으로 알려져 있다.⁴⁻⁶⁾ 또한 유전체 장벽방전(Dielectric Barrier Discharge,

DBD)이나 코로나(corona)의 경우에는 저 농도의 NO_x나 휘발성 유기화합물(Volatile Organic Compounds, VOCs)을 고 유량으로 처리하는데 유리한 기술로 평가되고 있는 반면,^{7,8)} 열분해와 같은 고온반응조건을 필요로 하는 공정에는 소요 전력이 지나치게 커 실제공정적용에는 문제가 있는 것으로 나타났다.⁹⁻¹¹⁾

따라서 본 연구에서는 저 전력으로 대 유량의 암모니아 폐가스를 처리할 수 있는 상압용 플라즈마 스크러버 기술개발을 위하여 대기압에서 작동되는 신장 회전아크(elongated rotating arc) 반응기를 개발하였다. 반응기의 형상변수(수축부 지름) 및 운전조건(방전전력)에 따른 방전특성의 비교 분석을 통해 공정효율(분해효율 및 에너지 효율)을 최적화 할 수 있는 방안을 제시하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1. 회전아크 반응기

DBD와 같은 저온 플라즈마는 아크 플라즈마에 비해 상대적으로 전자에너지는 높으나 화학적 활성도가 큰 화학 활성종의 발생농도가 낮아 열적 활성공정이나 부분산화 또는 연소와 같은 화학적 분해공정에는 적합하지 않다.¹²⁾ 반면에 아크토치와 같은 고온 플라즈마는 기존의 연소기술 등을 통하여 얻을 수 없는 고온의 요소기술을 제공할 수 있지만, 과도한 플라즈마 발생가스온도와 플라즈마 투입에너지가 반응에 참여하지 않는 주변기체의 엔탈피를 증가시키는 요소로 낭비되기 때문에 효율적이지 못한 수단으로 알려져 있다.¹³⁾

회전아크의 플라즈마 가스온도는 저온 플라즈마와 아크 토치의 중간 정도로서 아크채널 부근은 2,000~4,000 K, 그리고 아크의 후류영역은 1,500 K 수준으로 DBD 또는 펄스 코로나보다 플라즈마 가스온도는 높고, 기존의 DC 아크 토치보다 상대적으로 전자온도는 높아 열화학적 반응공정에 효율적으로 활용할 수 있는 고온 분위기 특성을 갖고 있다.^{14,15)} 회전아크 반응기의 형상과 아크거동은 참고문헌에

Fig. 2. Schematic of arc string behavior for each mode.¹⁶⁾

자세히 설명되어 있으며, 기존의 DC 아크토치에 비해 아크 길이가 길어 상대적으로 고전압 운전이 가능하기 때문에 운전전류를 낮출 수 있어 전극의 내구성 측면에서 유리한 형태의 반응기로, 넓은 주파수(frequency) 영역에 걸쳐 운전이 가능한 AC 플라즈마 반응기이다.

Fig. 2와 같은 회전아크 반응기에서는 운전전력의 크기에 따라 기본적으로 4개의 운전모드(mode)가 존재한다.¹⁶⁾ 낮은 모드에서 간헐적이고 비연속적이던 아크방전은 모드 III 부터는 아크가 전극 끝단에서 유지되어 연속적으로 방전하며 팽창하게 된다. 이 과정에서 높은 상태의 모드를 얻기 위해서는 단위유량 당 처리하는데 소요되는 에너지(Specific Energy Density, SED, kJ/L)가 더 많이 요구되는데, 이러한 SED의 증가가 단순히 전력 공급량 증가로 인한 반응기의 비효율을 의미하는 것은 아니다.

모드의 변화와 함께 플라즈마 에너지의 활용 형태도 변화하게 된다. 이는 메탄의 부분산화 반응에서 단위 수소 생산에 필요한 에너지(Specific Input Energy Density, SIED)와 전체 반응에 소요된 에너지(SED)의 관계를 보여주는 Fig. 3에 나와 있는 바와 같다.¹⁶⁾ 높은 모드를 얻기 위해서는 높은 SED 값이 필요하지만, SIED는 SED가 높을수록 낮아진다. 즉 모드가 높아질수록 공급된 전력을 더 효과적으로 사용하고 있는 것을 확인할 수 있다. 이러한 효율증가는 모드증가

에 따라 입력전력이 아크선의 길이 팽창에 사용되지 않고, 반응가스 영역으로의 열전달을 증가시키는 것이 그 요인으로 판단된다. 이와 같이 열적 활성의 촉진으로 부분산화공정을 통해 열과 수소가 제조되며, 이것이 다시 모드 IV 방전분위기 유지에 기여하게 되어 상호작용에 따른 시너지효과로 효율향상이 이루어진다.

이상의 모드제어는 적은 유량조건(수십 L/min 수준) 또는 발열공정이나 수소제조공정 등에서 용이하게 된다. 그러나 유량이 수백 L/min으로 증가되거나 반응공정이 약한 발열 또는 흡열공정, 그리고 아크가스의 농도가 수 ppm으로 낮은 경우에는 열적 환경조성이 어려워, SED 값의 조절만으로는 높은 아크모드나 최적 운전모드의 실현이 어려우므로, 반응기의 기하학적 설계를 통한 모드의 제어가 필요하다.

2.2. 실험장치

2.2.1. 회전아크 반응기 scale-up

대 유량을 처리하는 암모니아 제거공정 적용을 위해 기존의 회전아크 반응기를 스케일 업(scale-up)하여 Fig. 4와 같이 아크선(arc string)이 긴 신장 회전아크 반응기를 설계, 제작하였다. 대 유량 조건 처리를 위해서는 효과적인 열전달이 이루어질 수 있도록 아크선이 길고, 아크선에 의한 열적

Fig. 3. Comparison of specific input energy density or power required to produce unit volume of hydrogen in different modes of operation.

Fig. 4. Schematic drawing and electric field distribution.

반응영역이 형성될 수 있도록 SED 값이 충분히 큰 조건들이 필요하다. 아크선의 팽창은 전기장(e-field)이나 반응물의 유동장(reactant flow field)에 의해 결정된다.¹⁷⁾

즉 큰 전기장은 아크선 팽창을 유도하며, 종 방향 유동은 아크선의 대류 팽창을 촉진시키게 된다. 따라서 이러한 점을 고려하여 대 유량, 약한 발열공정 조건에서도 스케일 업 회전아크 반응기에 아크선이 부착될 수 있도록 반응기를 설계하였다. Fig. 4에서 보는 바와 같이 스케일 업 반응기는 목(throat) 형태의 수축부를 가지는데, 수축부에 전기장이 집중되어 아크선이 유인되며, 아크선의 종 방향 팽창을 유도하게 된다. 이 외에도 신장 회전아크 반응기에서 아크 발생모드에 영향을 주는 기하학적 변수로는 Fig. 4에 나타난 고전압 전극 끝단으로부터 수축부까지의 거리(L), 수축부 지름(d), 그리고 수축부 이 후 확대부의 지름(D) 등을 들 수 있다.

2.2.2. 실험장치

실험장치는 Fig. 5에 나타난 바와 같이 플라즈마 반응기를 중심으로 전력공급장치, 전력계측장치, 가스공급장치, 시료채취 및 분석장치로 이루어져 있다. 플라즈마 반응기는 동축형으로 내경이 40 mm인 원통 모양의 접지전극과 최대 지름부가 37 mm인 원뿔 형상의 고전압 전극으로 구성된다. 플라즈마 발생을 위한 전력공급은 AC 방식으로 최대전압 8 kV, 최대전류 4 A를 인가할 수 있으며, 주파수 20 kHz인 장치를 사용하였다. 방전가스는 전극침식 감소와 방전 안정화를 위해 선회(swirl) 유동을 갖고 두 전극 사이에 유입되도록 설계되었으며, 가스유량 조절을 위해 질량 유량계(Mass Flow Controller, MFC, 5051E, Brooks, 일본)를 사용하였다. 반응기에 공급된 전력은 오실로스코프(Oscilloscope, TDS 5054B, Tektronix, 미국)를 이용하여 측정한 전류와 전압파형으로부터 계산하였다. 또한 처리가스의 농도변화와 부산물 계측에는 광로(optical path) 8 m의 가스 셀을 장착한 적외선 분광계(Fourier Transform Infrared, FTIR, Vector 33, BRUKER, 독일)를 사용하였다.

Fig. 5. Schematic of the experimental apparatus.

2.3. 실험방법

우선 대 유량 처리가 가능한 신장 회전아크 반응기에서 방전전력의 변화에 따른 방전모드 특성분석을 위해서는 수축부 직경 $d = 12$ mm인 반응기를 이용하여 질소를 방전가스로 100 L/min 수준에서 아크의 거동을 관찰하였으며, 전압 및 전류파형을 함께 비교하였다.

또한 이와 같은 각각의 방전모드에서 암모니아 분해실험을 위해서는 전체가스의 유량 100 L/min 수준에서 암모니아를 1,000 ppm 농도로 공급하여 실험을 수행하였다. 암모니아 분해를 위해서는 약 800℃ 이상의 반응온도가 필요하며, 반응기 내 반응공간에서 온도분포가 균일할 때 높은 분해율을 기대할 수 있다. 따라서 방전모드 별 암모니아 분해특성을 플라즈마 반응기의 수축부 직경(d) 변화에 대하여 비교하였으며, 실험결과 최적의 직경을 이용하여 열분해 시스템을 설계하였고, 이를 이용하여 암모니아 분해용 스크러버 적용 가능성을 알아보았다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 방전전력에 따른 아크 발생 모드

Fig. 6은 수축부 직경 12 mm인 반응기를 이용하여 방전가스 유량을 100 L/min 수준에서 고정한 후, 3 kW 이내의 방전전력범위에서 변화에 따른 아크의 거동특성을 나타낸 결과이다. 실험결과 Fig. 2에 나타난 4가지 플라즈마 발생모드가 prototype의 스케일 업 반응기에서도 동일하게 구현될 수 있음을 나타내는 개념도이며, 방전전압 및 전류파형에서 보는 바와 같이 방전전력의 크기에 따라 회전아크의 방전특성이 달라짐을 알 수 있다.

대 유량 조건 처리를 위해 제안된 본 반응기에서도 모드 III 조건이 되면 아크선이 길이방향으로 팽창하면서 접지전극 쪽 반응기 끝단에 부착(anchoring)된 채로 반응물 유동에 의해 회전을 하는 전형적인 신장 회전아크의 방전특성을

Fig. 6. Schematic of arc string behavior in each mode with voltage and current oscillogram.

보임을 확인하였다. 각 모드 조건에 따른 방전 특성 변화를 통해 공정 최적화가 가능할 것으로 판단된다.

3.2. 아크 발생 모드에 따른 암모니아 분해특성

다양한 반응기 형상(목 크기)과 모드발생 조건에 따른 암모니아 분해특성을 비교하였다. 회전아크 반응기에서는 아크발생 모드에 따라 반응기 내의 열적 분위기가 변화하는데, Fig. 7(a)는 이러한 열적 집중효과를 나타내는 실험결과로서 모드변화에 따라 각각 다른 분해효율을 나타낸다. 또한 동일한 전력에서 수축부 직경(d) 14, 16 mm의 경우가 12, 18 mm의 경우에 비해 분해율이 우수한 것으로 나타났는데, 이는 처리가스의 유량과 방전전력이 주어지면 수축부 직경에 의해 결정되는 유동속도에 따라 수축부 근처에 발생되는 유동의 재순환 특성이 달라지고, 이에 따라 확대부 영역에서 발생하는 반응 온도장의 온도분포 형성에 영향을 주게 되어 분해율에 차이를 보이는 것으로 판단된다.

Fig. 7(b)는 단순한 분해율 대신 에너지 사용효율에 대해

Fig. 7. NH_3 decomposition efficiency according to each mode and compared energy efficiency.

비교한 실험결과로, 암모니아 1 g 처리하는데 소요되는 전기에너지(kWh)에 해당하는 에너지효율(Energy efficiency, g/kWh)을 모드 별, 그리고 수축부 지름에 대하여 비교하였다. 결과에서 보는 바와 같이 보다 높은 모드발생을 위해서는 투입전력을 증가시켜야 하지만, 에너지효율은 오히려 증가하는 것으로 나타났다. 각 모드에 따라 열화학적 분위기가 다르며, 모드 III의 경우가 에너지효율 측면에서 가장 우수한 것으로 나타났는데, 모드 IV의 결과가 모드 III보다 효율이 높지 않은 이유는 수축부 노즐 목으로부터 팽창된 아크선이 노즐 목 이후의 넓은 영역(확대부)에서는 가스온도를 증가시키는데 상대적으로 비효율적이기 때문으로 생각된다. Fig. 7(a) 및 (b)는 플라즈마 반응기에서 수축부 지름이 각 플라즈마 발생모드에 대한 SED 범위를 결정하는 가장 중요한 기하학적 변수임을 보여주는 결과로도 해석된다.

3.3. 암모니아 분해용 스크러버 시스템 평가

Fig. 8은 회전아크 반응기를 이용하여 반도체 공정라인에서 발생하는 암모니아 폐가스 처리용 스크러버 적용을 목적으로, Fig. 7의 실험결과 중 성능이 가장 우수한 수축부 직경 14 mm인 반응기를 이용하여 설계, 제작한 열분해 장치이다. 본 장치는 플라즈마 반응기의 확대부에서 방전가스로 공급되는 질소와 암모니아 가스를 반응 공간 내에 설치된 열교환기를 통해 고온의 반응 후 기체와 저온의 반응 전 기체 간의 열 교환을 유도하여 스크러버의 효율을 향상시키고 반응조건을 개선하도록 하였다. 이를 통해 고온의 가스를 이용

Fig. 8. NH_3 decomposition pyrolysis system.

하여 플라즈마를 발생하게 되며, 수축부 직전에 위치한 홀을 통해서 추후 첨가제 등을 공급하여 암모니아 열분해공정이 보다 효율적인 공정이 될 수 있도록 설계하였다.

Fig. 9(a)는 암모니아 열분해장치를 이용하여 Fig. 7과 동일한 유량조건에서, 4가지 방전모드에 대한 암모니아 분해율을 Fig. 7과 같이 플라즈마 반응기 단독으로 수행한 실험결과와 비교한 그림이다. 실험결과에서 보는 바와 같이 열분해 장치의 경우, 열교환 및 단열 등의 효과로 인해 플라즈마 반응기 단독인 경우와 비교해서 보다 적은 전력에서 동일한 방전모드가 발생되며, 결과적으로 동일 전력기준으로 볼 때 열분해 장치의 경우가 분해율이 증가하는 것으로 나타났다.

또한 Fig. 9(b)는 열분해장치에 대한 방전모드대비 에너지 효율을 플라즈마 반응기 단독인 경우와 비교한 그림이다. 열분해장치의 경우 분해율 결과와 마찬가지로 동일 방전모드에서 플라즈마 반응기 단독인 경우에 비해 에너지효율이 증가하는 것으로 나타났으며, 특히 방전모드 II와 III의 경

계영역 및 III에서 현저한 상승효과가 있는 것으로 나타났다. Fig. 9(b)의 결과에 따르면 에너지 효율측면에서는 방전모드 II와 III의 경계조건에서 운전하는 것이 가장 유리하지만, 분해율을 고려하면 분해율이 91% 수준으로 높은 모드 III이 최적 운전조건으로 판단된다.

4. 결론

대 유량 스크러버 개발을 위해 기존의 회전아크를 이용하여 개발된 신장 회전아크 반응기의 제작 및 성능평가를 수행하였다. 이를 통해 각각의 방전모드에 따라 아크 거동특성이 달라지며, 결과적으로 공정의 효율과 이에 따른 전력소비량이 달라지는 것을 확인하였다. 저 전력, 대 유량의 암모니아 폐가스 처리를 위한 본 연구 결과는 아래와 같이 정리할 수 있다.

1) 회전아크의 방전 시에 관찰되는 방전모드의 변화는 반응 시 발생하는 방출열량, 투입전력, 그리고 반응기의 기하학적 형상에 의해 결정되는 것을 확인하였다. 방출열량이 충분히 크거나 방전에 유리한 부산물들이 생성되면 최적의 운전모드가 상대적으로 쉽게 구현될 수 있지만, 그렇지 못한 경우에는 반응기의 기하학적 형상설계를 통해 4가지 방전모드의 구현 및 최적 운전모드 구현이 가능함을 확인하였다.

2) 4가지 방전모드 변화에 따른 암모니아 분해율을 측정한 결과, 방전전력(혹은 방전모드)이 증가할수록 분해율은 증가하였으며 에너지효율로 나타낸 결과, 방전모드 I~II 구간에서는 방전모드가 증가할수록 에너지효율이 증가하였으나, 모드 III~IV에서는 다소 감소하는 것으로 나타났다. 이는 수축부 노즐 목으로부터 팽창된 아크선이 노즐 목 이후의 넓은 영역의 가스온도를 증가시키는데 상대적으로 비효율적이기 때문으로 생각된다.

3) 열교환기를 포함하는 스크러버 시스템 열분해장치는 모든 조건에서 플라즈마 반응기 단독으로 수행한 결과보다 적은 전력에서 동일한 방전모드가 발생되며, 결과적으로 동일 전력기준으로 볼 때 분해율이 증가하는 것으로 나타났다.

4) 에너지효율과 분해율을 고려할 때 모두 상대적으로 좋은 결과를 보여주는 모드 III이 최적 운전조건으로 판단되며, 모드 III의 경우 에너지효율이 약 32% 증가하는 것으로 나타났다.

따라서 적정모드에서 운전을 하게 되면 신장 회전아크 반응기에서의 화학공정을 최적화할 수 있을 것으로 판단되며, 배기제어나 반도체 공정가스 처리는 물론 여러 화학공정에서 효율적인 폐 가스처리공정 기술로 이용될 수 있을 것으로 기대된다.^{18,19)}

(a) Decomposition efficiency

(b) Energy efficiency

Fig. 9. Comparison of NH₃ decomposition efficiency and energy efficiency between plasma reactor only and pyrolysis system.

사 사

이 연구는 중소기업청의 지원을 통한 제조현장녹색화사업과 한국기계연구원의 주요사업으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

KSEE

참고문헌

- Choi, S. S., Park, D.-W. and Watanabe, T., "Thermal plasma decomposition of fluorinated greenhouse gases," *Nuclear Eng. Technol.*, **44**(1), 21~32(2012).
- Bonarowska, M., Burda, B., Juszezyka, W., Pielaszek, J., Kowalczyk, K. and karpinski, Z., "Hydrodechlorination of CCl_2F_2 (CFC-12) over Pd-Au catalysts," *Appl. Catal. B-Environ.*, **35**, 13~20(2001).
- Wang, H. P., Liao, S. H., Lin, K. S., Huang, Y. J. and Wang, H. C., "Pyrolysis of PU/CFCs wastes," *J. Hazard. Mater.*, **58**, 221~226(1998).
- Fiala, A., Kiehlbauch, M., Mahnovski, S. and Graves, D. B., "Model of point-of-use plasma abatement of perfluorinated compounds with an inductively coupled plasma," *J. Appl. Phys.*, **86**(1), 152(1999).
- Hong, Y. C., Kim, H. S. and Uhm, H. S., "Reduction of perfluorocompound emissions by microwave plasma-torch," *Thin Solid Films*, **435**, 329(2003).
- Kabouzi, Y., Nantel-Valiquette, M., Moisan, M. and Roataing, J. C., "Abatement of greenhouse gases using surface-wave microwave discharges sustained at atmospheric pressure," *Proceedings of 17th International Symposium on Plasma Chemistry*(2005).
- Kim, H. H., "Nonthermal plasma processing for air-pollution control: A historical review, current issues, and future prospects," *Plasma Proc. Polym.*, **1**, 91(2004).
- Song, Y. H., Cha, M. S., Kim, Y., Kim, K. T., Kim, S. J., Han, S. O. and Choi, K. I., "Synergistic effects of nonthermal plasma and catalysts on VOCs decomposition," *J. Adv. Oxid. Technol.*, **6**, 17(2003).
- Kim, Y., Kim, K. T., Cha, M. S., Song, Y. H. and Kim, S. J., "CF₄ decomposition using streamer and glow mode in dielectric barrier discharges," *IEEE Trans. Plasma Sci.*, **33**(3), 1041(2005).
- Chang, J. S., "Removal of NF₃ from semiconductor-process flue gases by tandem packed-bed plasma and adsorbent hybrid systems," *IEEE Trans. Ind. Applications*, **36**(5), 1251(2000).
- Kim, K.-T., Kim, Y. H., Cha, M. S., Song, Y.-H., Kim, S. J. and Ryu, J. I., "Decomposition characteristics of PFCs for various discharge methods in Dielectric Barrier Discharge," *Kor. Soc. Atmos. Environ.*, **20**(5), 625~632(2004).
- Fridman, A., "Plasma chemistry (Cambridge, UK: Cambridge University Press)," (2008).
- Bora, B., Aomoa, N. and Kakati, M., "Characteristics and temperature measurement of a non-transferred cascaded DC plasma torch," *Plasma Sci. Technol.*, **12**, 181~187(2010).
- Lee, D. H., Kim, K. T., Cha, M. S. and Song, Y.-H., "Optimization scheme of a rotating gliding arc reactor for partial oxidation of methane," *Proc. Combust. Inst.*, **31**, 3343~3351(2007).
- Hwang, N., Song, Y. H. and Cha, M. S., "Efficient use of CO₂ reforming of methane with an arc-jet plasma," *IEEE Trans. Plasma Sci.*, **38**, 3291~3299(2010).
- Lee, D. H., Kim, K. T., Cha, M. S. and Song, Y.-H., "Plasma-controlled chemistry in plasma reforming of methane," *Int. J. Hydrogen Energy*, **35**, 10967~10976(2010).
- Korolev, Y. D., Frants, O. B., Geyman, V. G., Landl, N. V. and Kasyanov, V. S., "Low-current gliding arc in an air flow," *IEEE Trans. Plasma Sci.*, **39**, 3319~3325(2011).
- Lee, D. H., Lee, J. O., Kim, K. T., Song, Y. H., Kim, E. and Han, H. S., "Hydrogen in plasma-assisted hydrocarbon selective catalytic reduction," *Int. J. Hydrogen Energy*, **37**, 3225~3233(2012).
- Kim, K.-T., Lee, D. H., Lee, J. O., Cha, M. S. and Song, Y. H., "CF₄ treatment characteristics using an elongated arc reactor," *Kor. Soc. Atmos. Environ.*, **26**(1), 85~93(2010).