

CONVERGENCE RESEARCH REVIEW

융합연구리뷰

2025

4월호 Vol. 11 April

플라즈마-촉매 공정의 특성과 시사점
이대훈(한국기계연구원 책임연구원)

대한민국 지역혁신클러스터 정책과
향후 방향성
이규택(전북테크노파크 원장)



미래융합전략센터
Future Convergence Strategy Center

CONTENTS

03 편집자주

04 플라즈마-촉매 공정의 특성과 시사점

40 대한민국 지역혁신클러스터 정책과 향후
방향성

편집자주

더 이상 먼 미래의 기술이 아니게 된 플라즈마

이온화된 기체 상태로 전자, 이온, 여기 중 등의 높은 에너지 입자를 품은 플라즈마는 기존의 환경 정화 기술을 넘어, 에너지 전환 및 지속가능 공정 분야로 응용 범위를 넓히고 있다. 전기에너지를 직접 활용할 수 있다는 장점은 탄소중립 시대에 플라즈마 기술의 가치와 가능성을 더욱 부각시킨다.

본 호 기술리뷰에서는 플라즈마 기술이 전통적인 환경 분야에서 수소 생산, 질소 고정 등 에너지 관련 분야로 확장되는 흐름을 다룬다. 저온 플라즈마, 촉매와의 융합 반응, 그리고 에너지 효율 개선을 위한 기술적 시도는 플라즈마가 단순한 반응 촉진 도구를 넘어 새로운 공정 설계의 열쇠가 될 수 있음을 보여준다.

플라즈마-촉매 융합은 현재 치열한 연구 경쟁이 벌어지고 있는 첨단 융합기술 분야이다. 그 가능성과 도전 과제를 짚으며, 미래 친환경 공정 기술의 방향성을 가늠해보자.

지속가능한 발전...이제는 ‘지역’에서 찾아야 할 때

산업과 인구가 수도권에 집중되고 있다. 지역 간 불균형은 심화되고 잠재적 국가 경쟁력을 저해하고 있다. 이러한 배경 속에서 정부는 지역 주도의 혁신 생태계를 구축하기 위한 다양한 정책을 추진해왔다.

지역혁신클러스터는 기업·대학·연구기관 간의 협력을 통해 지속 가능한 혁신이 이루어지는 체계를 지향한다. 유럽 연합의 스마트 특성화 전략, 미국 실리콘밸리처럼 세계 각국은 이미 지역 중심의 융합 전략을 통해 기술력과 산업 경쟁력을 높이고 있다. 우리나라 역시 국가혁신클러스터, 스마트특성화, 규제자유특구 등 다양한 정책을 통해 지역 성장 동력 확보에 나서고 있으나, 수도권 쏠림 현상, 산학연 연계 미흡, 기술 인재 유출 등 여러 구조적 한계도 함께 안고 있다.

본 호 정책리뷰에서는 지역혁신클러스터 정책에 주목하며, 그 이론적 기반부터 국내외 사례 비교, 정책의 성과와 한계를 다룬다. 지역혁신을 융합의 측면에서 바라보면 지역과 사람, 산업이 함께 성장하는 색다른 접근 방식임을 확인할 수 있을 것이다.

융합기술

플라즈마-촉매
공정의 특성과
시사점

이 대 훈

한국기계연구원 책임연구원

1 서론

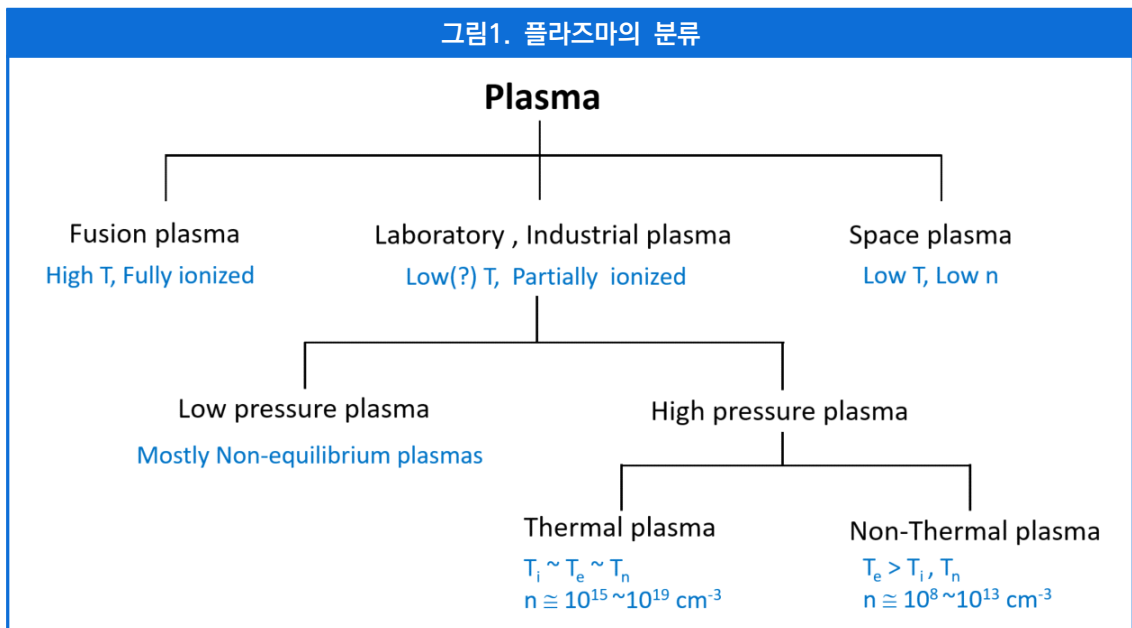
1. 플라즈마

플라즈마는 이온화된 기체 상태로 높은 에너지 상태의 전자, 이온, 여기 종들을 가지고 있는 상태를 의미한다. 전자, 이온, 여기 종들이 가지고 있는 높은 화학적 반응성과 더불어 플라즈마 생성 기체의 높은 엔탈피로 인해 다양한 화학반응에 적용하고자 하는 노력이 진행되고 있다. 전통적으로는 대기압 플라즈마의 산업적 적용은 초기에 저농도의 휘발성 유기화합물(VOCs), 질소산화물(NO_x) 등 오염물질의 제거와 같은 환경 공정에 주로 적용이 되어 연구가 진행되어 왔다. 상당한 기간의 연구를 통해 기술적으로는 다양한 응용 분야가 개발 되어지고 상용화 수준에 이르기까지 기술적 성숙도가 높은 상태에 이르렀다. 한편 최근 탄소중립의 이슈가 부각되면서, 전기에너지에 기반한 플라즈마 공정이 주목을 받고 있는데, 그 이유는 재생 전력을 직접 활용하여 공정을 진행할 수 있기 때문이다. 이러한 이유로 인해 최근에는 플라즈마 기술의 적용이 sustainability와 연관된 수소(합성가스) 생산, 수소화, 질소고정 등 에너지 관련 분야로 확대되고 있다. 이러한 새로운 분야에 대한 연구는 아직 충분한 연구가 이루어지지 않았고, 산업에 연계될 수 있는 공정 기술을 확보하기 위해 각 국의 연구자들이 매우 치열하게 연구를 진행하고 있고, 관련한 논문의 발표 건수가 최근 들어 급증하고 있다.

플라즈마의 적용이 전통적인 오염물질 제거 등의 공정에서 지속가능 공정으로 관심이 이동되면서, 공정의 에너지 효율이 점점 더 중요한 공정 평가의 지표가 되고 있다. 이에 따라 플라즈마 단독으로 활용하는 것보다 촉매와 연계하여 에너지 효율과 반응 특성을 개선하고자 하는 시도가 좀 더 적극적으로 진행되고 있다.

플라즈마는 발생 방식에 따라 전자밀도, 전자 온도가 다양하게 형성이 되고 이에 따라 플라즈마의 종류를 분류하기도 한다. 통상 가장 일반적인 분류는 전자와 이온, 여기중, heavy particle의 상대적인 온도를 기준으로 고온 플라즈마와 저온 플라즈마로 분류가 된다. 이때의 ‘고온’은 핵융합에서 관찰되는 바와 같은 높은 이온화도에 따른 수백만~수억도까지의 온도 범위를 의미하고 일반적으로 산업에 적용되는 플라즈마는 ‘저온’ 플라즈마로 분류된다.

저온 플라즈마는 다시 non-thermal 혹은 cold plasma와 thermal plasma로 분류가 되며 thermal plasma에서는 전자의 온도와 heavy particle의 온도가 근접하며, 해석 과정에서 local thermal equilibrium 조건을 적용하기도 한다. 대표적인 non-thermal plasma는 주로 저압(진공) 조건에서 활용되는 글로우 방전, 상압에서 주로 활용되는 DBD(Dielectric barrier discharge), 코로나 방전이 있으며, spark 방전도 non-thermal plasma로 분류될 수 있다. 분류하는 관점에 따라 non-thermal로 분류하는 경우도 있으나, 회전온도와 진동온도가 근접하는 아크, 마이크로웨이브, 유도결합 방전 플라즈마 등은 thermal plasma로 분류할 수 있다.



* 출처: 저자 작성

non-thermal plasma와 thermal plasma의 대표적인 발생 방식과 특성은 표 1에 제시된 바와 같다. 이러한 물리, 화학적 특성을 고려하여 플라즈마의 적용 대상과 적용 방식을 선정하게 된다.

표 1. Thermal plasma와 Non-thermal(Cold) plasma의 특성 비교

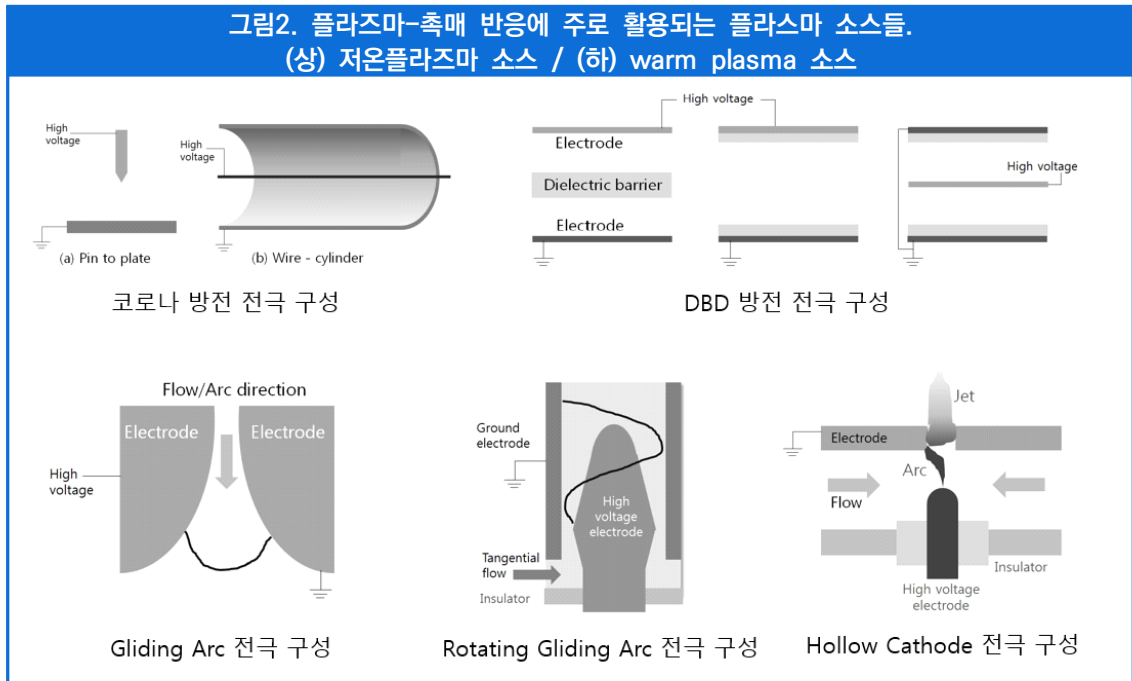
	Thermal Plasma	Cold Plasma
Generation	Arc discharge	Glow or Corona
Power Supply	DC, AC, RF (low voltage, high current)	DC, AC, RF, MW (high voltage, low current)
Temperature	$T_e=T_i=T_g=10^3-10^5\text{K}$ LTE High thermal capacity	$T_e=10^4-10^5\text{K}$, $T_i=T_g=\text{few } 10^3\text{K}$ Non-LTE Low thermal capacity
Plasma Density	$10^{15}-10^{19}\text{cm}^{-3}$	$10^8-10^{13}\text{cm}^{-3}$
Pressure	$10-10^3\text{torr}$	$10^{-4}-10(10^3)\text{torr}$ (Glow) $10-10^3\text{torr}$ (Corona)
Uniformity	Medium or Poor	High (Glow) Low (Corona)
Major Role	High-temperature heat source	Physical & chemical reactor

기본적으로 플라즈마는 비평형 현상이며, 플라즈마를 구성하는 전자, 이온, 라디컬, 중성 분자 등의 플라즈마 구성 요소가 에너지를 어떻게 나누어 가지고 있는지가 non-thermal / thermal 플라즈마의 특성을 결정하게 된다.

한편 플라즈마는 통상 전기에너지를 이용, 높은 전기장을 생성하여 발생시키게 되며 사용되는 전력의 공급 형태(주파수)에 따라 DC/AC/RF/MW 등의 방식을 사용한다. 플라즈마는 전기 에너지를 사용하여 발생시키는 특성상 에너지 비용이 높은 한계를 가지게 된다. 이러한 플라즈마의 한계를 극복하기 위해 촉매를 플라즈마와 결합하여 활용하기 위한 방법들이 연구되고 있다.

그림2는 플라즈마-촉매 반응에 주로 활용되는 대표적인 플라즈마 발생장치들을 보여준다. 코로나, DBD(Dielectric Barrier Discharge, 유전체 장벽 방전)의 경우 저온 플라즈마 특성을 가지고 있으며 Gliding arc, RGA(Rotating Gliding Arc), Hollow Cathode plasma 의

경우 저온 플라즈마 보다는 열플라즈마에 가까우나, 여전히 기체 온도가 전자 온도에 비해 높지 않아 저온 플라즈마와 열플라즈마의 특성을 모두 가지는 warm로 분류가 되기도 한다. 저온 플라즈마나 warm 플라즈마가 열플라즈마보다 플라즈마-촉매 반응에 주로 활용되는 이유는 기체온도가 상대적으로 낮아 촉매의 반응 온도 범위를 넘어서지 않게 구성할 수 있는 것이 주된 이유이다.



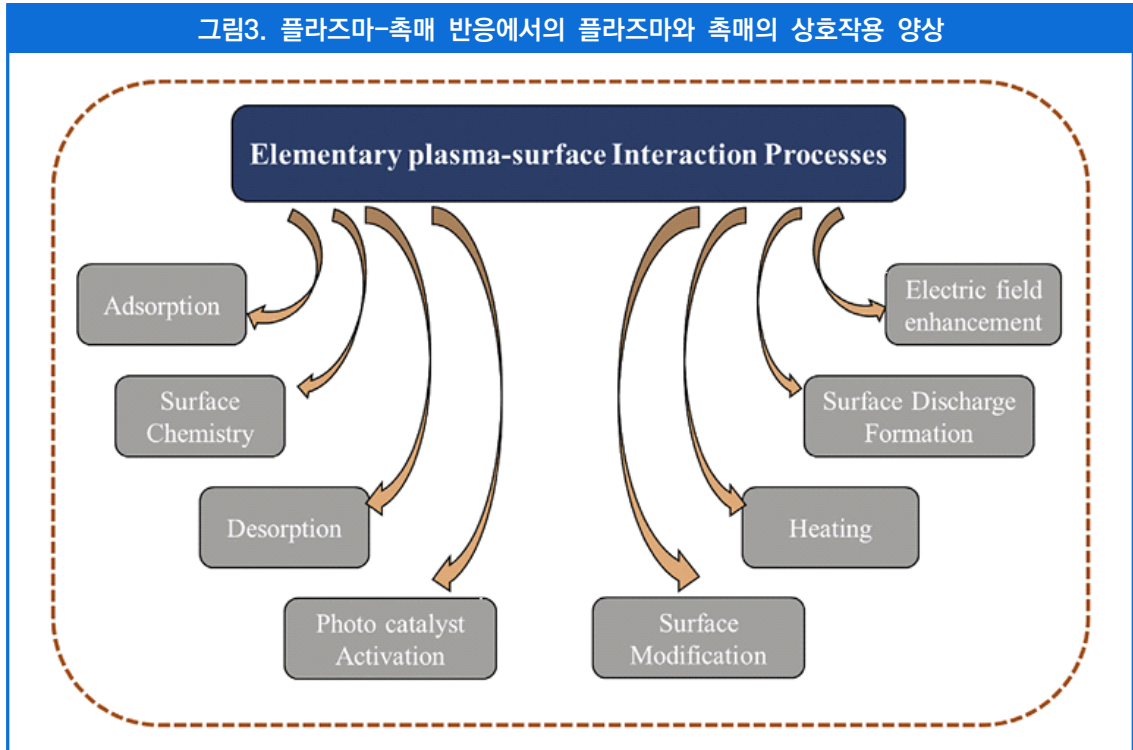
* 출처: 저자 작성

한편, 플라즈마와 촉매는 그 특성상 상반된 성격을 가지고 있다. 촉매는 흡착을 통해 낮은 에너지 상태의 반응물을 활용할 수 있도록 하는 반면, 플라즈마는 분자 또는 원자의 내부 에너지를 변화시켜 반응물을 높은 에너지 상태로 활용할 수 있도록 한다. 촉매는 흡착 과정에서 촉매 물질과 반응물에 따른 반응의 선택성을 확보할 수 있지만, 플라즈마의 경우 각 활성종들의 에너지 분포는 통계적 거동에 지배되는 특성을 가진다.

플라즈마와 촉매를 함께 활용하는 반응에 대한 개념은 이러한 상반된 특성이 새로운 시너지를 만들어 낼 수 있을 것이라는 기대에 기반하고 있다. 하지만, 플라즈마와 촉매가 융합되는 과정에서 어떠한 형태로 융합하는가에 따라 실제적으로 반응의 양상 자체가 달라지게 된다.

단순히 플라즈마와 촉매를 공간적으로 병합하는 것은 융합의 시너지를 보장하지 않고 오히려 반응의 효율을 떨어뜨리는 결과를 가져오기도 한다. 실제 플라즈마와 촉매의 결합은 플라즈마가 촉매의 상태에 영향을 주고, 촉매가 플라즈마의 발생 상태에 영향을 주는 상호작용을 하게 되어, 그림 3에 제시된 바와 같이 상당히 복잡한 양상의 상호작용을 하게 된다.

그림3. 플라즈마-촉매 반응에서의 플라즈마와 촉매의 상호작용 양상



* 출처: Asif Hussain Khoja et al. (2021)

본 논고에서는 이러한 점들을 고려하여 플라즈마와 촉매의 융합 과정에서의 특성과 고려할 점 들을 중심으로 논하고자 한다.

2 플라즈마-촉매 융합 반응

2. 플라즈마-촉매 융합 방식

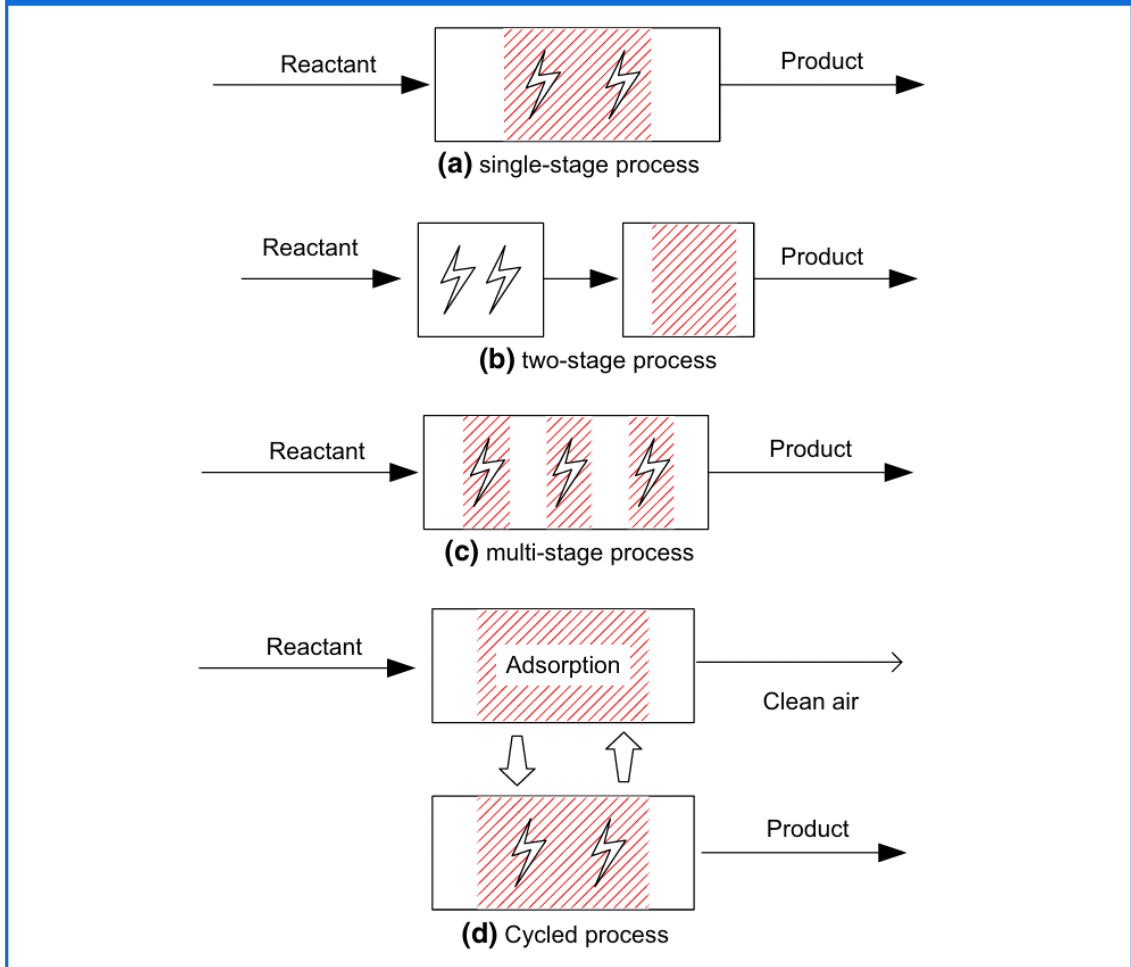
플라즈마와 촉매 융합의 양상은 플라즈마와 촉매 각각의 특성, 그리고 플라즈마와 촉매가 결합되는 양상에 따라 그 특성이 상이하게 달라지며, 이러한 요인들은 1) 반응기의 configuration, 2) 적용 플라즈마의 type, 3) 활용하는 reaction mechanism, 4) 주된 반응 종, 등을 생각해 볼 수 있다. 이러한 요인들은 플라즈마와 촉매의 결합과정에서 시너지가 발생할 수 있을지의 여부와 반응의 효율을 결정하는 요인이 된다.

각 요인들이 어떻게 존재하며, 실제 반응을 구성할 때 어떠한 점들을 고려해야 하는지에 대해 알아보도록 하자.

2.1. 반응기의 Configuration

우선적으로 플라즈마와 촉매의 결합 과정에서 플라즈마가 발생하는 공간에 촉매가 있는지의 유무에 따라 서로 다른 반응기 configuration이 구성된다. 우선, 플라즈마가 발생하는 공간 내에 촉매가 있는 in-plasma catalysis와 플라즈마 발생공간과 촉매반응공간이 분리된 post plasma catalysis로 분류할 수 있다. 플라즈마-촉매 반응은 플라즈마에 의해 생성된 화학종 또는 열이 촉매 반응에 유효하게 활용되는 관점을 의미하기 때문에 촉매 후단에 플라즈마가 설치되는 경우는 플라즈마-촉매 반응으로 분류하지 않는다. 경우에 따라 플라즈마-촉매 반응기가 별도의 촉매 반응기(또는 흡착반응기)와 함께 구성이 되는 경우도 있다.

그림4. 플라즈마-촉매 반응기 구성의 다양한 개념

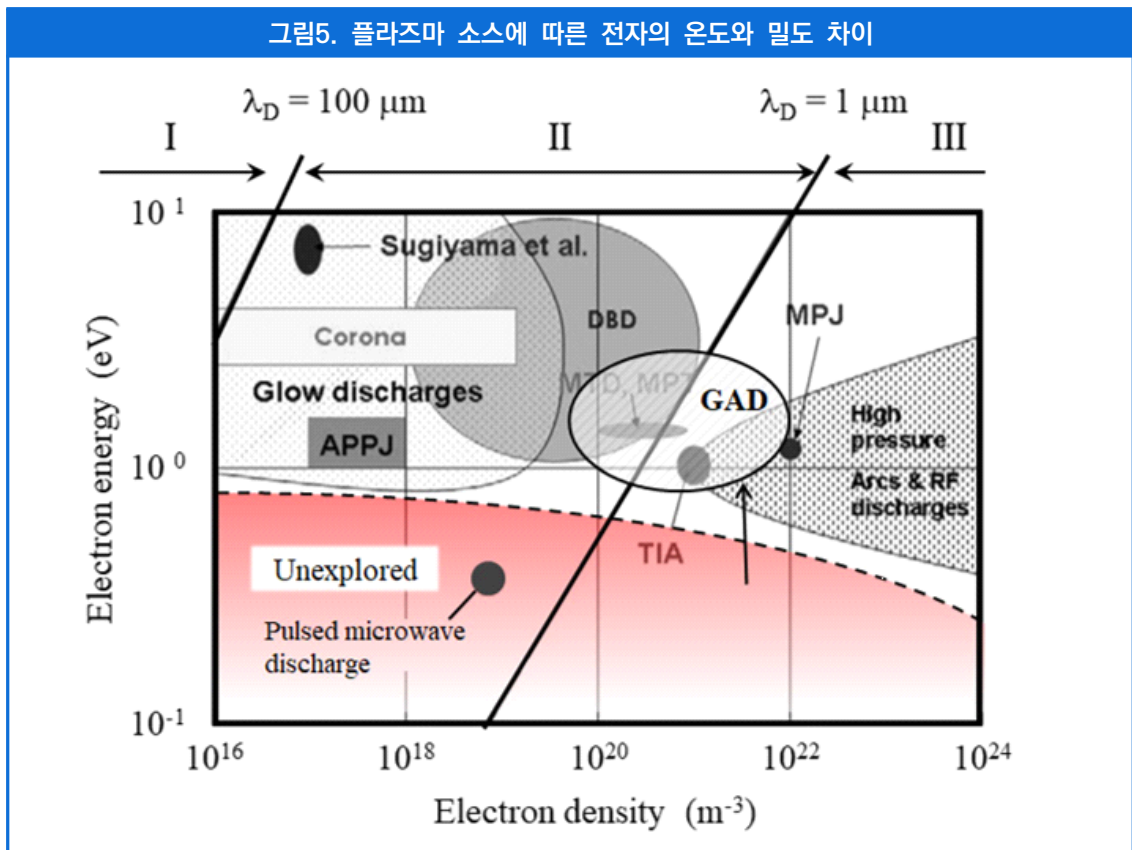


* 출처: Asif Hussain Khoja et al. (2021)

in-plasma catalysis는 말 그대로 방전 공간 내부에 촉매를 위치시켜 플라즈마와 촉매의 상호 작용을 유도하는 방식이다. 플라즈마 발생과 반응 과정에서의 촉매의 sintering과 열적 손상의 가능성을 고려하여 이러한 방식에서는 주로 저온 플라즈마인 DBD(Dielectric Barrier Discharge, 유전체 장벽 방전)를 활용하여 DBD의 전극(유전체) 사이 공간에 촉매를 위치시키거나 코로나 방전을 생성하여 평판 전극 쪽에 촉매를 위치시키는 형태를 가질 수 있다. 이 경우 플라즈마 발생을 위한 breakdown을 보장하기 위해 전극 간 거리가 수 mm 이내로 제한되고, 촉매를 위치시킬 수 있는 공간 또한 이러한 전극(유전체) 사이 공간으로 제한되는 특성을 가진다.

2.2. 적용 플라즈마의 type

앞서 소개된 바와 같이 플라즈마 소스의 type에 따라 반응의 환경이 달라진다. 서로 다른 플라즈마 소스에 의한 차이는 1) 전자의 온도, 2) 전자의 밀도, 3) 중성종의 온도(기체온도) 형태로 나타나며, 이 차이가 촉매와의 상호작용 양상의 차이를 결정하게 된다. 전자 에너지의 분포에 따라 생성되는 이온, 라디칼, 여기 중성 종의 상대적 밀도가 달라지게 되며, 이에 따라 반응의 경로에 대한 차이가 만들어질 수 있다.



* 출처: Nozaki T. et al. (2023)

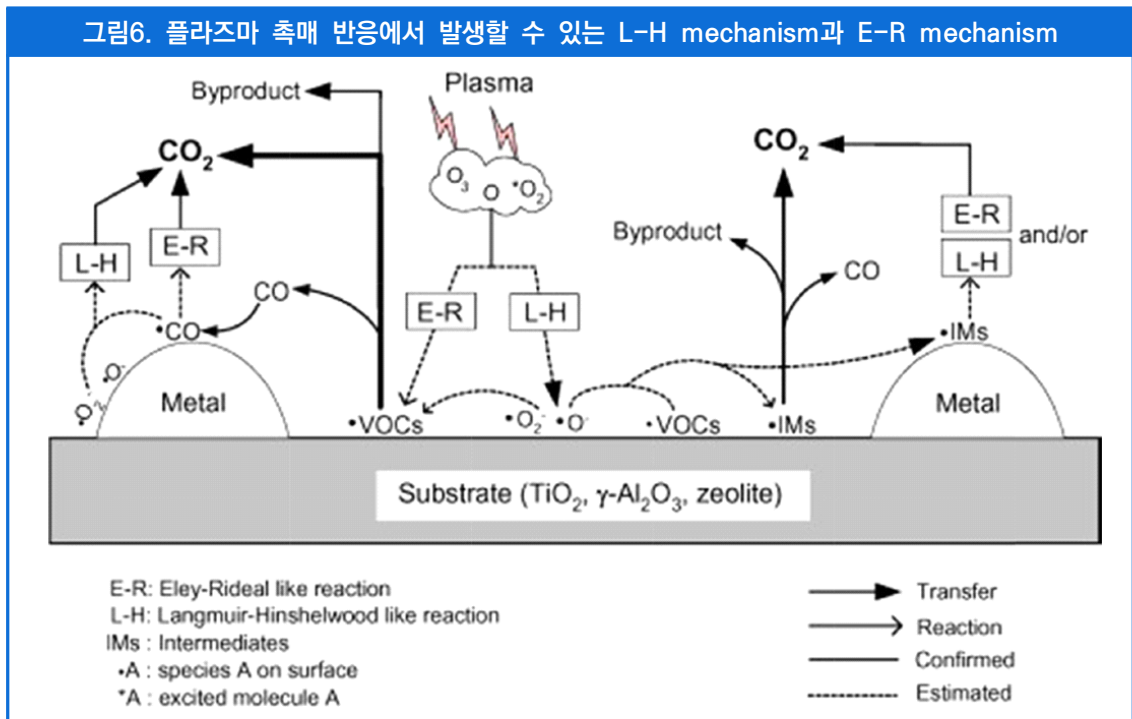
이러한 전자 밀도와 온도의 차이는, 1차적으로는 기상에서 생성되는 이온, 라디칼, 여기중성 종의 밀도와 에너지에 영향을 주고, 2차적으로는 이들 플라즈마 생성종들이 촉매상에 접근해서 일으키는 반응의 에너지 상태에 따른 reaction path의 변화를 야기하게 된다. 한편 촉매의 존재는 플라즈마의 발생 상태에 영향을 주게 되어 촉매의 물질과 상태에 따라 이러한 전자의 온도와 밀도 자체가 영향을 받게 되는 interaction 양상이 발생하여, 이러한 변화가 다시 촉매 상에서의 반응에 영향을 주는 형태의 상호작용이 발생할 수 있다.

플라즈마 소스에 따라 전자의 온도와 밀도가 달라지면서, warm plasma에서는 기체의 온도도 크게 달라진다. 수백 K에서 1,000K 이상의 온도까지, 플라즈마 발생 특성에 따라 촉매의 열화학 반응에 영향을 주는 변화가 발생한다. 플라즈마가 제공하는 전자 등의 고에너지 화학종과 열의 상대적 기여도를 고려할 때, 전자와 이온의 밀도에 대한 고려가 필요하다. 통상 저온 플라즈마의 경우 상대적으로 전자의 평균 에너지는 수 eV 범위로 높지만 전자의 밀도는 sub ppm, ppb 수준에 이르는 범위가 되므로 고농도의 대상 물질에 대한 반응을 목적으로 할 때는, 에너지 효율 측면에서 불리한 조건이 된다. 반면 촉매에 대한 열 공급 관점에서는 전체 중성기체에 대한 기체 온도의 상승을 야기하여 에너지 사용 측면에서 저온 플라즈마보다 유리한 조건을 제공한다. 이에 따라 플라즈마-촉매 반응을 설계할 때, 플라즈마의 존재를 통해 촉매 반응에 어떠한 기능을 제공하는 것이 목적인지가 우선적으로 고려되어야 한다.

2.3. 활용하는 Reaction mechanism

플라즈마는 이온화된 기체 상태이며, 기본적으로 기상에서의 전자 충돌로부터 다양한 형태의 비탄성 충돌반응 (ionization, dissociation, electron attachment, excitation 등) 이 야기된다. 촉매는 기본적으로 촉매 상에 흡착된 흡착물의 반응을 전제로 하며, 이러한 흡착 과정을 통해 반응의 활성화 에너지를 낮출 수 있는 이점을 활용하는 반응 방식이다. 이때 촉매 표면에서의 반응물이 모두 흡착된 상태에서 반응하는 경우(Langmuir Hinshelwood mechanism, L-H)와 일부만 흡착된 상태에서 흡착 종과 기상 종이 반응(Eley-Rideal mechanism, E-R)하는 경우가 발생할 수 있다. 통상의 촉매 반응은 대부분 L-H 방식의 반응이 주를 이루고 있다. 이는 흡착 상태에서 가장 낮은 에너지 경로를 찾을 수 있기 때문이

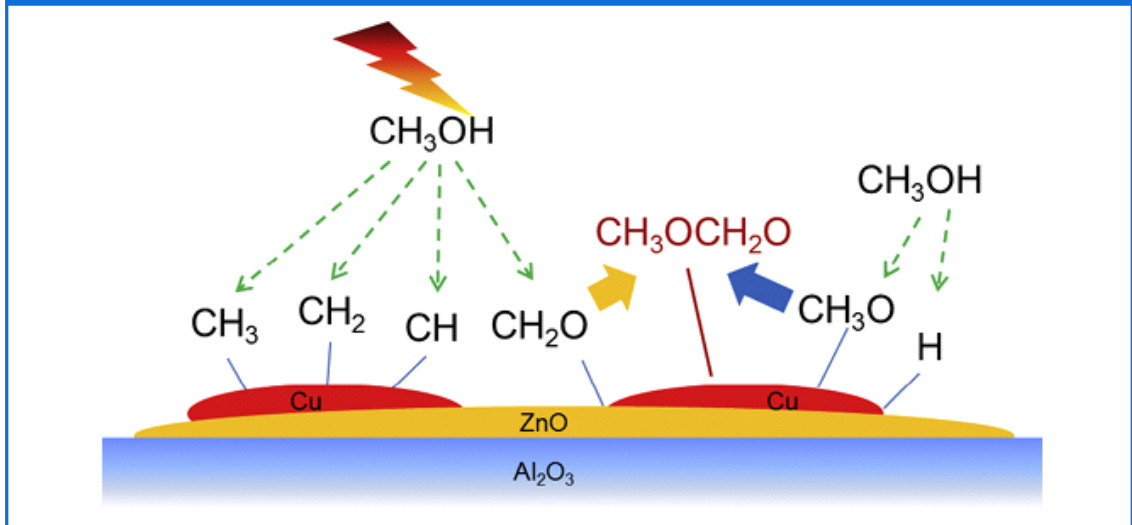
다. 하지만 플라즈마-촉매 반응의 경우, 기상에서 우선적으로 플라즈마에 의해 발생한 기상의 라디칼 또는 여기 화학종이 가지는 excess energy에 의해, 흡착 상태의 낮은 에너지 path가 아닌 경로로 흡착 종과 반응할 가능성이 높아진다.



* 출처: Hyun-Ha Kim et al (2008)

이러한 반응경로의 변화가 반응에서의 속도결정단계(RDS, Rate Determining Step)를 제거하는 플라즈마-촉매 반응에서의 E-R 반응이 반응 속도를 높이고 저온에서의 활성을 높일 수 있는 경로가 만들어지게 된다. 또한 L-H 경로도 분자 상태의 반응물이 아니라 플라즈마에 의해 생성된 화학종들의 흡착으로 반응이 진행되는 경로가 발생할 수 있다.

그림7. 플라즈마에 의한 촉매 반응 경로 변화



* 출처: Taegyu Kim et al. (2014)

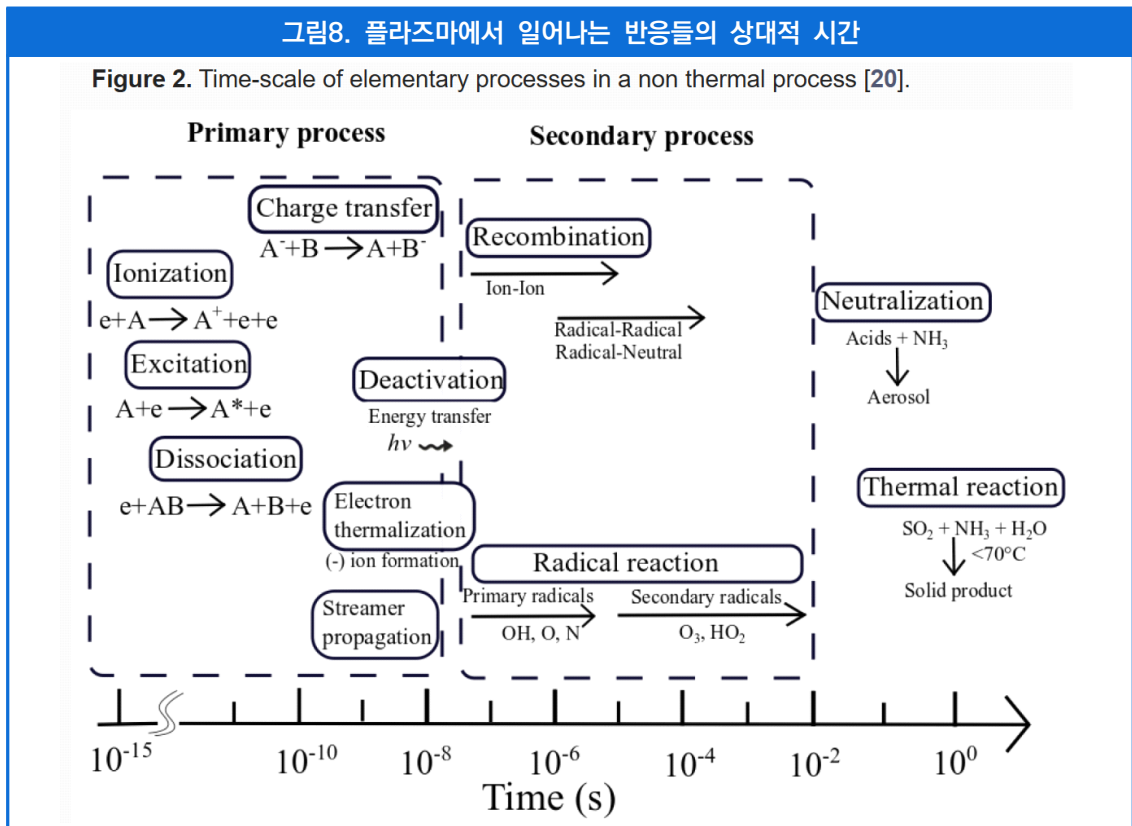
2.4. 반응에 참여하는 주된 화학종

플라즈마-촉매 반응에서는 기본적으로 플라즈마 반응과 촉매 반응의 반응 공간이 공간적으로 분리되어 있다. in plasma catalysis의 경우에도 플라즈마 상태를 유지하는 공간과 촉매 반응이 일어나는 촉매 표면은 엄밀하게 공간적으로 분리가 되어 있으며 플라즈마가 생성하는 화학종들이 촉매 표면으로 전달되는 것으로 이해할 수 있다. 이러한 차이는 또한 플라즈마 생성의 시간 스케일과 촉매 화학 반응의 시간 스케일의 차이가 발생할 수 있음을 쉽게 생각해 볼 수 있게 한다. 플라즈마와 촉매의 상호작용을 고려하기 이전에 플라즈마가 생성하는 화학종들의 life time 에 대해 이해한다면, 플라즈마와 촉매의 상호작용이 주로 어떤 양상에 의존하는가에 대해 이해할 수 있게 된다. 실제 전자의 충돌을 그 근간으로 하는 플라즈마의 발생에서, 전자의 발생과 충돌과정에서의 소실의 시간 스케일은 매우 짧은 것으로 알려져 있는 반면, 플라즈마에서 생성된 라디칼의 life time 은 상대적으로 매우 긴 것으로 알려져 있다.

플라즈마에서 일어나는 이온화, 여기, 재결합, 분해 등 다양한 탄성/비탄성 충돌이 가지는 시간 스케일에 대한 개략적인 범위가 그림8에 나와 있다. 그림에서 이해할 수 있듯이 ionization, charge transfer, dissociation 등 전자가 직접 기여하고 참여하는 반응들의 경

우 ns 이하의 매우 짧은 시간 scale을 가지고 있다. in plasma catalysis의 경우에도 방전 공간과 실제 표면 화학 반응이 일어나는 촉매 표면이 공간적으로 이격되어 있음을 고려한다면, 플라즈마의 primary process 즉 전자가 직접 촉매 표면에 작용할 가능성은 없다는 것을 알 수 있다. 또한 secondary process 과정에서 생성되는 라디칼의 life time이 상대적으로 길어서 촉매의 active site로 전달될 수 있는 가능성이 훨씬 높다는 것을 고려한다면, 앞 절에서 라디칼에 의한 E-R mechanism이 플라즈마-촉매 반응의 상호작용에서 매우 중요한 기능을 차지한다는 것을 쉽게 이해할 수 있다. 따라서 플라즈마-촉매 반응의 설계에 있어 의도하는 반응 경로와 기능이 라디칼 또는 excited 화학종에 의한 반응을 중심으로 이루어져야 한다.

그림8. 플라즈마에서 일어나는 반응들의 상대적 시간

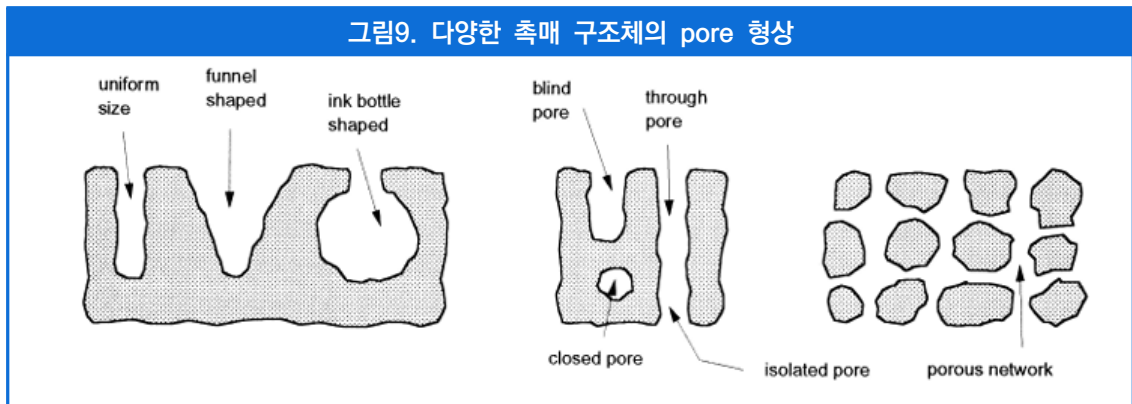


* 출처: Ye, Z. et al. (2018)

3. 플라즈마-촉매 반응의 고려 사항

3.1. 플라즈마의 촉매 접근성 : 공간적 이슈

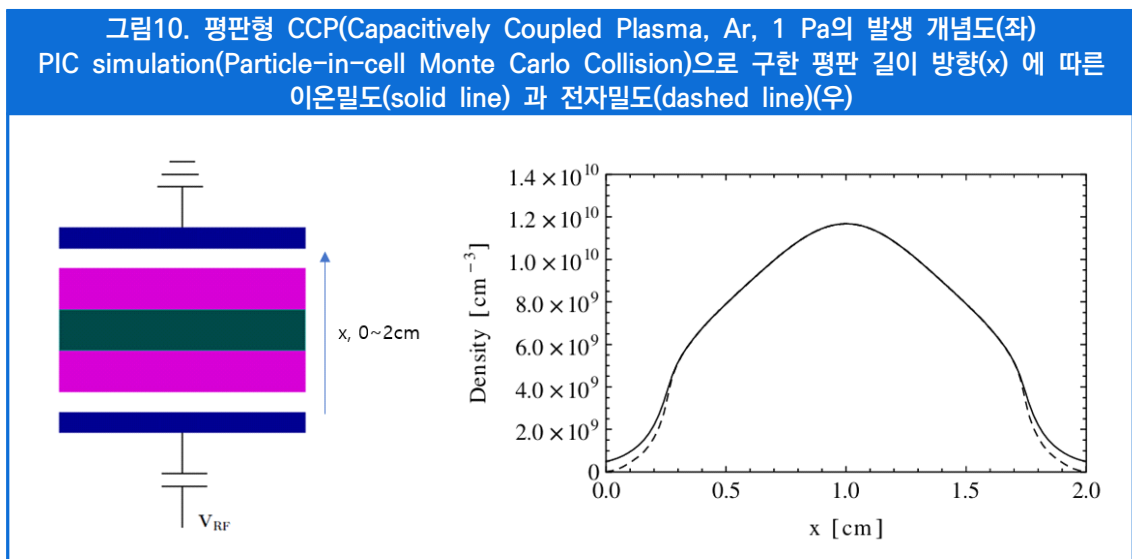
촉매의 경우 통상 support 물질에 생성이 되어 active site가 분포되며, 반응의 표면적을 높기 위해 porous한 support 물질상에 이러한 active site들이 분산되도록 한다. 이러한 다공성 구조는 그림9와 같이 다양한 형상을 가질 수 있지만, 유효하게 표면적을 넓히기 위해 이런 macro, micro pore의 크기는 가능한 작은 크기로 생성되도록 한다.



* 출처: G Leofanti et al. (1998)

macro pore, micro pore들을 고려하면 실제 이러한 micro channel들은 주로 sub micron 범위에서 구성이 된다. 통상의 촉매 반응에서는 반응물이 diffusion을 통해 active site로 전달이 되고, 촉매 상에서 반응이 진행된다. 따라서 촉매 반응에서는 이러한 반응물의 전달 시간 scale과 반응을 통해 소비되는 turn over frequency에 의해 반응의 속도가 결정된다.

한편, 플라즈마는 기본적으로 전자와 이온이 집합적 거동으로 중성을 유지하는 이온화된 상태이며 플라즈마를 발생시키는 전극 주변에서는 전자와 이온의 상대적인 모빌리티 차이에 의해 이러한 중성 상태가 깨어진 sheath 영역이 존재하게 된다. sheath 영역에서는 높은 전기장으로 인해 전자가 플라즈마에 공급되는 역할을 하는데 플라즈마 발생 조건에 따라 달라지지만 두께가 보통 mm에서 sub-mm 정도의 길이 스케일을 가진다. 즉 sheath 영역에서의 전자의 밀도는 중성 상태인 플라즈마 영역보다 매우 낮은 값을 가지게 된다.

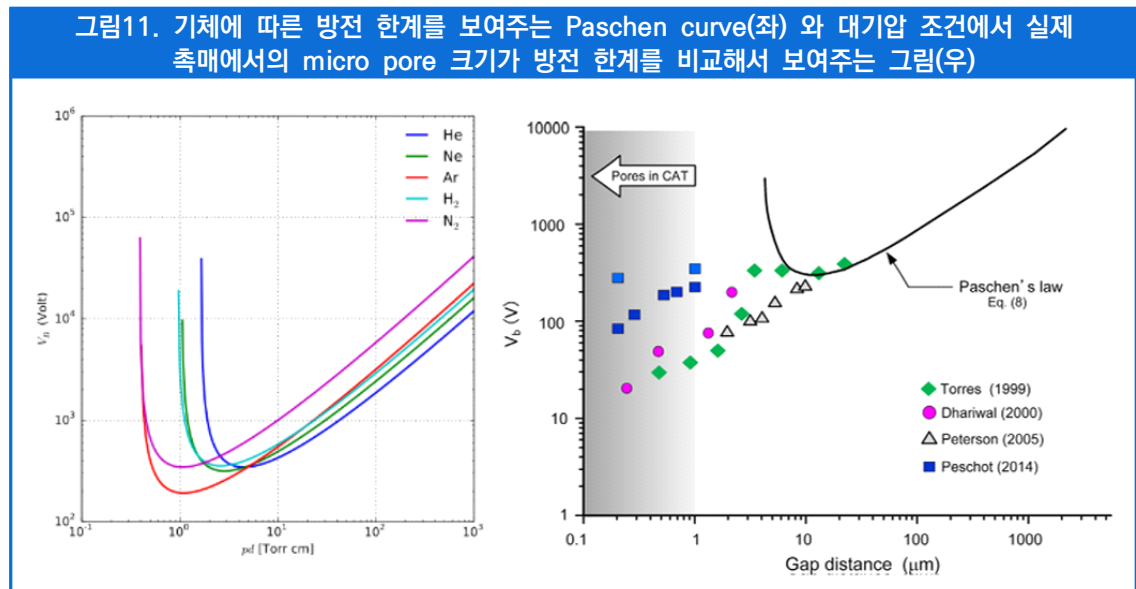


* 출처: Shihab et al. (2013)

이는 촉매가 존재하는 macro 또는 micro pore 내에서는 플라즈마의 발생이 어렵다는 의미다. 플라즈마에서 중성 상태의 방전공간은 중성인 전기적 특성으로 인해 potential drop이 거의 발생하지 않고 전극 간에 인가된 전위차는 주로 sheath 영역에서 발생하게 되고 sheath 영역에서 높은 전기장을 형성하게 된다. 이렇게 sheath 영역에서 전자와 이온이 전기장에 의해 가속되어 중성 상태의 플라즈마 공간에 공급이 되는데, mm 이하의 공간에서는 사실상 pore 내부 공간 전체가 전기적 포텐셜을 가지는 상태가 되어 중성 상태의 플라즈마 공간을 유지할 만한 시간적, 공간적 기회가 없어진다. 경우에 따라 촉매의 micro pore 내에서 플라즈마가 생성되는 것으로 이해하는 경우가 있는데, 이러한 형태의 현상은 실제 발생할 수 없다.

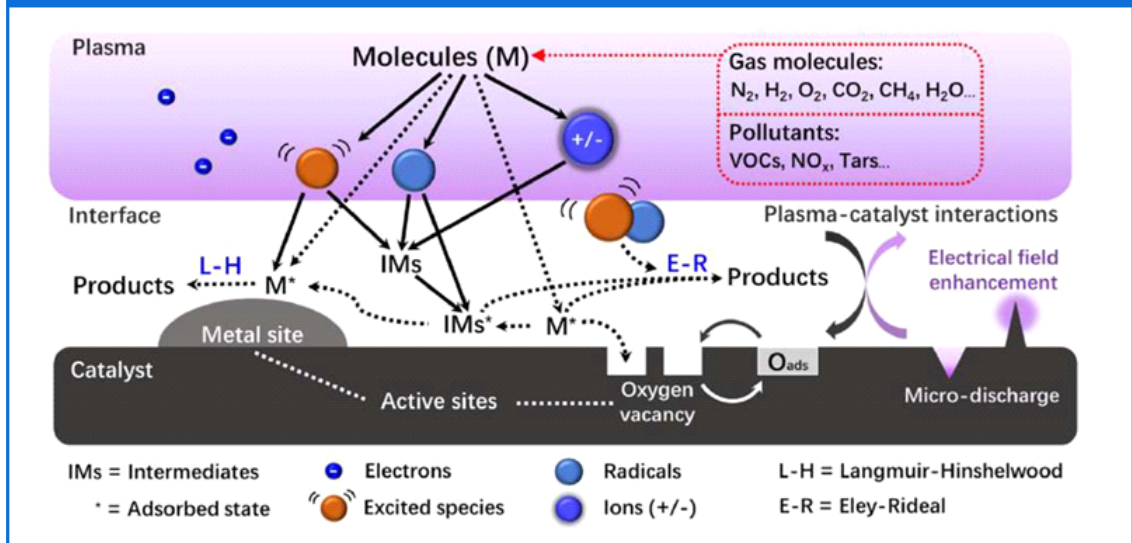
실제 기체 breakdown 특성을 설명하는 Paschen 곡선을 기준으로 생각해 보면, P.d 즉 방전간격과 압력의 값이 특정 값 이하가 되면 breakdown이 발생하지 않게 된다. 그림11에 나와 있는 바와 같이 대기압 방전 조건에서 수 μm 이하의 공간에서는 아무리 높은 전압을 인가해도 방전이 발생하지 않음을 알 수 있다.

그림12를 보면 전극 사이에 촉매가 위치한 in plasma catalysis 를 포함 모든 경우의 플라즈마-촉매 반응에서 방전영역과 촉매 반응 영역은 명확히 공간적으로 분리된 것을 개념적으로 잘 보여주고 있다. 플라즈마 발생과, 촉매 반응은 공간적으로 분리되어 있지만, 전기장, 전극면의 유전 특성, 촉매 표면의 온도 변화(주로 유전 가열 등의 형태를 통한), 촉매 표면으로 공급되는 화학종의 상태 변화 등의 고리로 플라즈마 발생과 촉매반응이 상호작용을 하고 있는 것이다.



* 출처: Hyun-Ha Kim et al. (2015)

그림12. 플라즈마와 촉매의 상호작용 양상에 대한 개념도



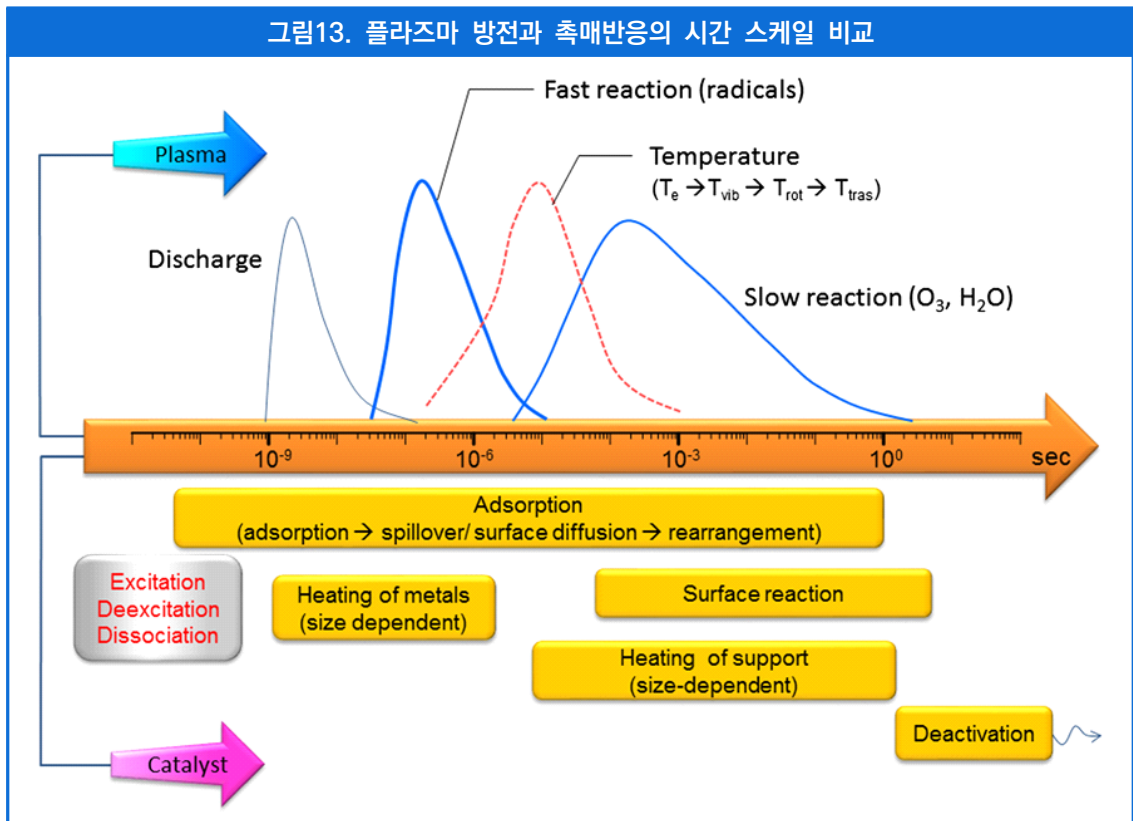
* 출처: Annemie Bogaerts et al. (2020)

따라서 플라즈마-촉매 반응에서 사실상 유효하게 반응에 활용될 수 있는 플라즈마 생성종은 pore 외부의 공간에서 생성되고 pore 내부로 전달(transport) 또는 확산(diffusion)되는 화학종 들이며, 이러한 시간 스케일을 가질 수 있는 화학종은 라디칼 또는 여기 중성 종의 형태가 된다. 즉 전자에 의한 직접적인 반응 경로는 플라즈마-촉매 반응에서는 만들어지기 어렵다.

3.2. 플라즈마의 촉매 접근성 : 시간적 이슈

앞서 언급된 바와 같이 플라즈마 발생의 시간적 스케일과 촉매 반응의 시간적 스케일 차이를 이해하는 것이 플라즈마-촉매 반응이 가지는 반응 특성을 이해하는 데 도움이 된다. 그림13은 플라즈마에서 발생하는 현상들의 시간 스케일과 촉매 표면에서 발생하는 현상들의 시간 스케일을 비교해서 보여준다. 방전과 전자의 생성-소멸, 이에 따른 dissociation, excitation과 같은 반응은 ns 스케일에서, radical이 참여하는 반응 중 빠르게 진행되는 반응들의 경우 μs 스케일, 느린 라디칼 반응은 ms 이상의 스케일에 걸쳐 일어나며, 여기화학종들의 relaxation은

$\mu\text{s}\sim\text{ms}$ 에 걸쳐 일어나게 된다. 촉매 반응의 경우 흡착-표면반응-탈착의 과정이 상대적으로 넓은 범위의 시간대에 걸쳐 일어나게 되며 이때, 반응물의 surface diffusion이 반응 시간 스케일의 결정에 큰 영향을 주는 요인이 된다.

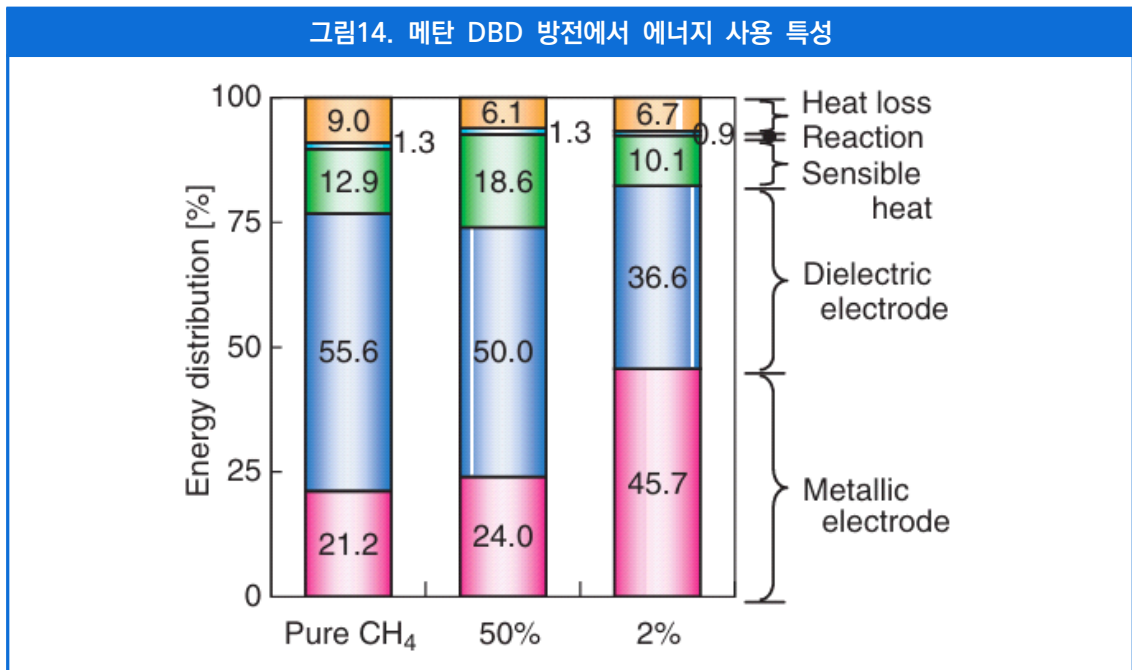


* 출처: J. Christopher Whitehead (2019)

위 그림을 통해 볼 때 post plasma catalysis 형태의 반응기 configuration을 설계한다면, 고려해야 할 점은 플라즈마가 생성해낸 라디칼을 촉매가 활용할 것인지, 아니면 플라즈마가 만들어낸 열만을 활용할 것인지를 결정하는 것이다. 촉매가 만들어낸 라디칼을 촉매가 활용하려고 하면, 라디칼의 life time 내에 촉매의 active site에 transport될 수 있도록 방전 공간과 촉매 사이의 거리와 반응물 유속에 대한 계산이 이루어져야 한다.

3.3. 플라즈마 촉매 반응에서의 ‘열’ 이슈

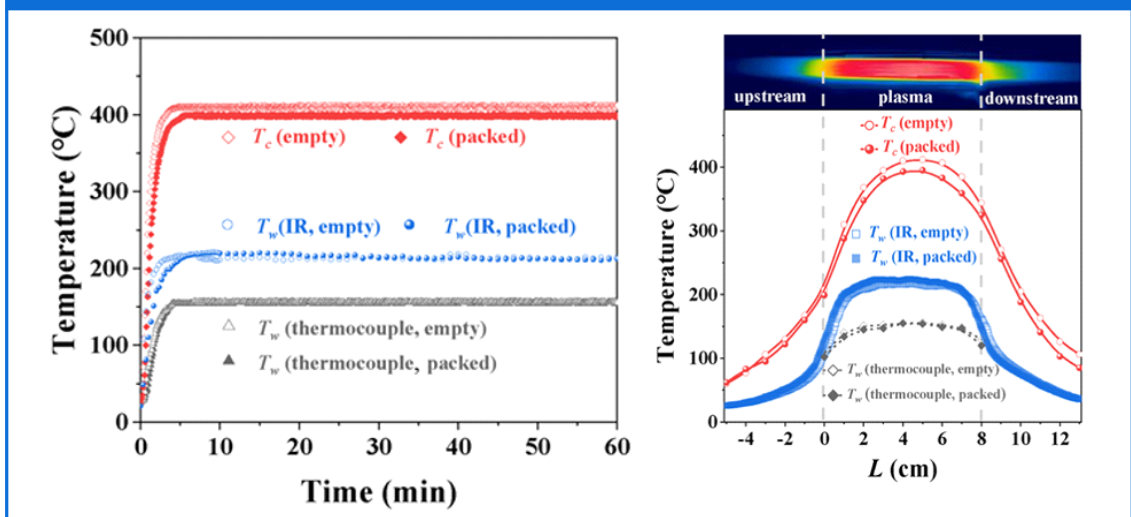
플라즈마-촉매 반응에서 가장 많이 활용되는 DBD의 경우 저온 플라즈마로 분류가 되고 플라즈마 발생 과정에서 발열 혹은 기체 온도 상승이 높지 않은 특성을 가진다. 하지만, 기체 온도 상승과 더불어 고려해야 할 사항은 전극사이에 배치되는 유전체에서 발생하는 유전가열에 대한 부분이다. 통상 DBD 운전 시 발생하는 유전가열은 전압의 제곱과 주파수, 유전율에 비례하는 것으로 알려져 있다. 실제 높은 전압과 kHz 대 주파수로 주로 운전되는 DBD의 경우 유전가열로 인한 발열 및 열손실이 반응 시스템의 효율에 매우 큰 영향을 주게 된다. 방전 시스템의 구성에 따라 달라지겠지만, 그림14에 나와 있는 바와 같이 DBD 발생을 위해 공급하는 에너지의 대부분은 반응기의 금속전극, 유전층 물질로 전달된다.



* 출처: Nozaki Tomohiro et al. (2001)

이로 인해 실제 플라즈마-촉매 반응의 진행 과정에서 gas enthalpy를 기준으로 반응 온도를 고려하게 되면 오류가 발생하게 된다. 즉, 플라즈마-촉매 반응이라고 해서 실제 제시하는 온도보다 훨씬 높은 온도에서 반응이 발생하고 있을 가능성이 발생한다. 이 경우 반응의 특성 변화, 즉 전환율 상승, 선택도 상승 등의 반응 결과는 플라즈마와 촉매를 결합한 시너지 효과가 아니라, 상당 부분 촉매의 반응 온도 상승에 따른, (촉매 성능 특성) 결과일 가능성이 높아진다. 그림15와 같이 최근의 연구를 보면 통상 플라즈마 촉매 반응 연구에서 보고하는 실제 열전대(Thermocouple)로 측정된 온도와 실제 반응기 내 온도가 상당히 차이가 있음을 보고하기도 한다. 해당 결과에서는 열전대로 측정한 DBD 반응기 온도와 IR로 측정한 온도가 70도 정도의 차이가 발생한다고 보고하고 있다. 결과에서는 방전 과정에서 촉매의 유무와 상관없이 기본적으로 전력 공급에 따른 기체(반응물) 온도 상승을 관찰하고 있으며, 이러한 열적 변화가 촉매 반응에 미치는 영향에 대해 정당하게 평가되어야 한다.

그림15. DBD 방전에서 측정 방식에 따른 온도 차이 결과



* 출처: Li, Ming et al. (2025)

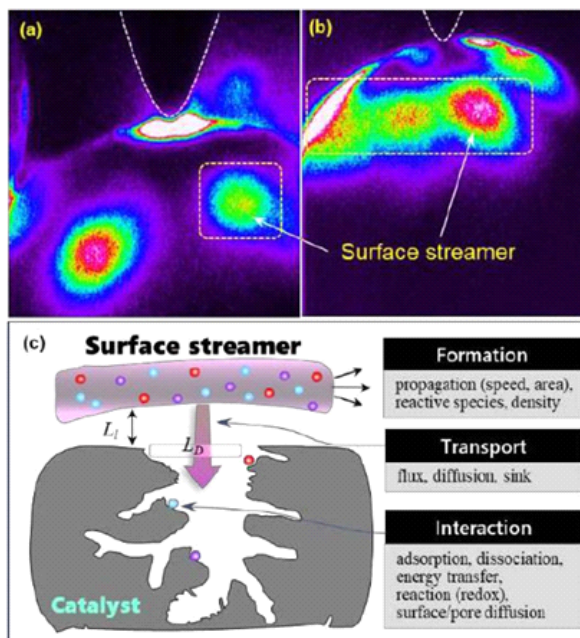
DBD를 활용한 플라즈마-촉매 반응의 경우 bulk 온도와 더불어 Streamer 발생시의 local 온도에 대한 고려도 되어야 한다. 그림16에 나와 있는 바와 같이 플라즈마-촉매 반응기에서 streamer가 발생할 경우, streamer site에서의 국소적인 가열이 발생할 수 있다. 뒤에 다루겠지만, 이러한 streamer 발생 특성은 촉매 물성에 상당 부분 기인하는데, 경우에 따라서 이러한 국소 가열의 범위와 시간이 촉매의 열적 활성화에 유효하게 영향을 줄 수 있는 범위가 될 수 있는 가능성이 발생한다. streamer 발생의 시간 스케일이 길지 않아서 이러한 가열 특성이 유효하게 반응에 기여할 수 있는지의 여부는 streamer 생성 특성에 대한 부분도 함께 고려되어야 하는데, 이러한 active site에서의 국소적인 가열 양상은 흡착 관점에서는 불리하게 작용하고, 표면 반응 관점에서는 유리하게 작용할 수 있다.

이러한 특성들을 고려하여 국소적인 가열이 가지는 유효한 시간 스케일과 반응 스케일에 대한 검토 또한 반응기의 설계에 고려될 필요가 있다.

플라즈마 발생이 야기하는 반응 site 및 반응물 기체의 온도 상승이 촉매의 열화학 반응 온도 변화를 야기해서 반응 특성이 바뀌는 부분은 사실, 플라즈마-촉매 방식의 반응을 고려하지 않아도 촉매로도 충분히 얻을 수 있는 결과가 된다. 플라즈마를 발생시키기 위한 과정에서 에너지가 소요 되는데, 이와 동일한 양의 에너지를 단순히 가열에 활용한다면, 플라즈마 보다 훨씬 높은 온도로 촉매를 가열하고, 더 나은 반응 특성을 얻을 수 있기 때문이다.

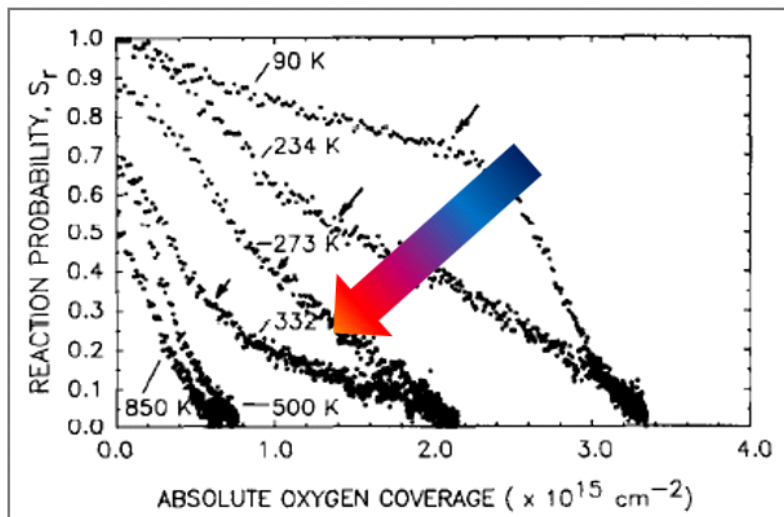
많은 경우에 플라즈마-촉매 반응을 통해 전환율이 상승되고 선택도가 상승했다는 긍정적인 결과들을 발표하면서, 기존의 촉매 반응의 열효율을 넘어서는 것으로 오해하는 경우가 많다. 이 경우는 플라즈마 발생에 소요되는 에너지를 고려하지 않은 채 촉매 반응의 향상만을 이야기하는 경우인데, 특히 고농도의 반응물을 전환하는 공정에서는, 거의 모든 경우에 플라즈마-촉매 반응에 사용하는 에너지보다 훨씬 작은 에너지로, 촉매만으로도 더 뛰어난 결과를 얻을 수 있다. 따라서 플라즈마-촉매 공정을 적용하기로 했다면, 실제적인 플라즈마와 촉매 결합의 효과가 무엇인지에 대한 면밀한 고찰이 요구된다.

그림16. 플라즈마-촉매 반응에서 촉매 표면의 상태에 따라 달라지는 streamer의 ICCD



* 출처: Annemie Bogaerts et al. (2020)

그림17. 온도에 따른 흡착 특성 변화

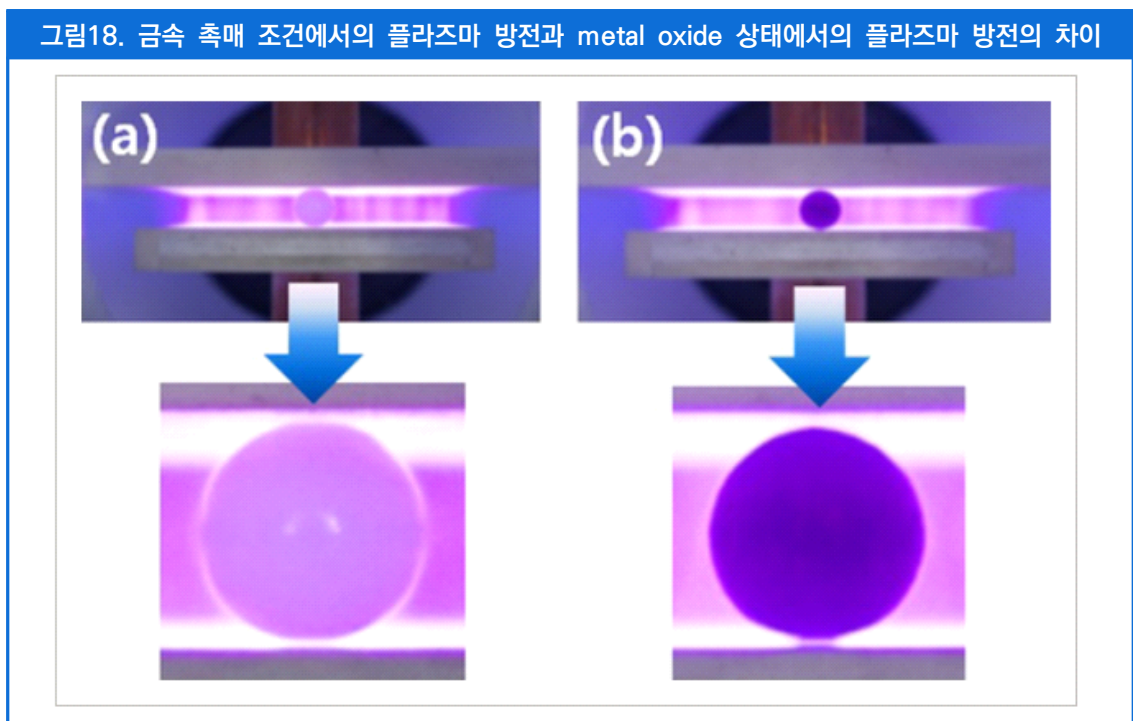


* 출처: Smentkowski V.S. et al. (1990)

3.4. 플라즈마-촉매 반응에서의 촉매 선정

촉매 단독 반응을 할 때와 플라즈마-촉매 반응을 할 때, 사용하는 촉매의 선정에 있어서 서로 다른 기준이 요구된다. 특히 DBD 플라즈마를 사용할 경우 전극 사이에 위치시키는 촉매가 유전율에 따라 유전층의 역할을 하거나, 도체의 역할을 하면서 방전 양상 자체를 변화시킬 수 있기 때문이다. 그림18은 전극 사이에 단일 촉매 비드 (γ -알루미나에 코팅된 Cu 촉매)를 넣고 방전을 일으킨 경우에 촉매가 Cu 상태일 때와 CuO로 산화되어 있을 때의 방전 양상의 변화를 보여준다.

그림18. 금속 촉매 조건에서의 플라즈마 방전과 metal oxide 상태에서의 플라즈마 방전의 차이



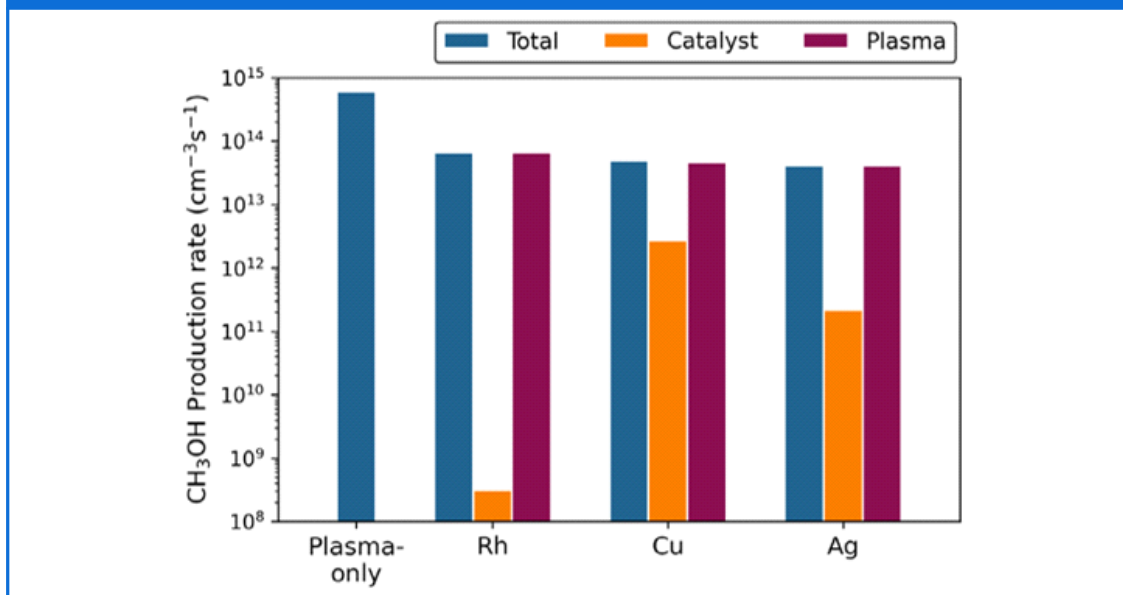
* 출처: Taegyu Kim et al. (2016)

이러한 차이는 금속 산화물 상태는 유전체가 되어 촉매층 전체가 유전체 장벽 방전의 유전체 일부 형태로 방전에 기여하게 되기 때문이다. 그림19에서도 이러한 경향을 확인할 수 있는데, γ -알루미나 인 (a) 에서의 방전 양상과 Ag가 코팅된 상태(b) 에서의 방전 양상이 달라진다. 이러한 차이는 금속 성분에 의해서 촉매의 유전율 변화가 발생하고, 촉매 표면에서의 전기 전도도 차이에 의해 surface의 charge transfer가 용이하게 발생하기 때문이다.

예를 들어 산화 반응을 유도하는 반응에서, 촉매의 기능이 주된 역할을 하고 있는 경우라면, 귀금속 촉매나 금속 촉매가 일반적인 산화물 촉매보다 훨씬 더 좋은 성능을 보여준다. 하지만, 반응 온도가 낮아서 촉매의 기능이 주된 역할을 하고 있지 않고 플라즈마에 의한 직접 산화 기능이 지배적인 경우라면 산화물 촉매가 더 뛰어난 반응 특성을 보일 수 있다.

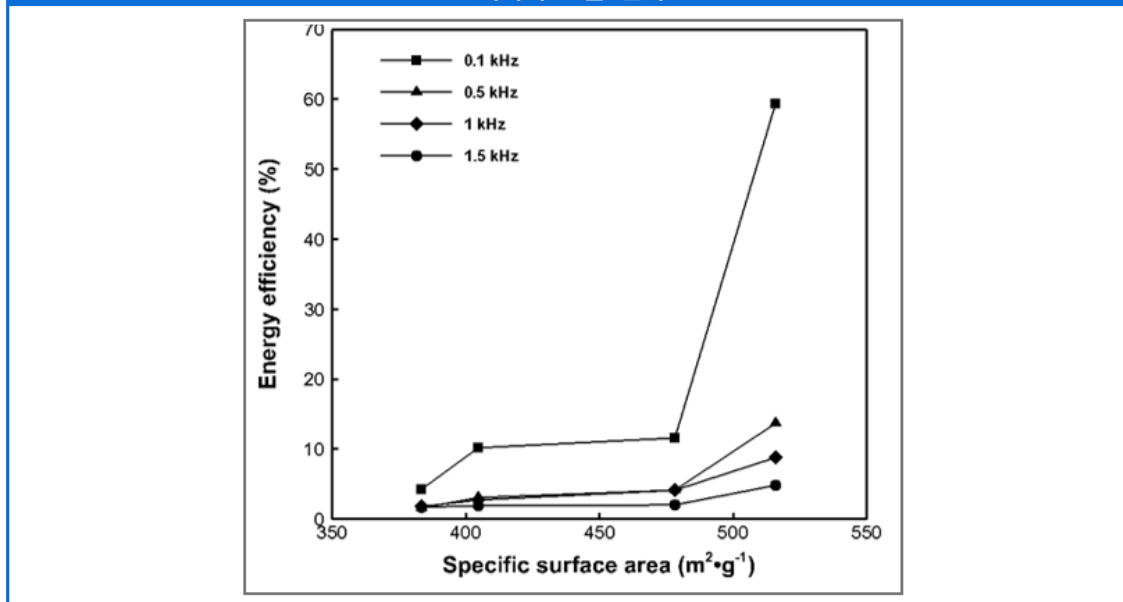
이러한 차이는 또한 금속 촉매와 산화물 촉매의 radical scavenger로서의 기능 차이에 의한 변화를 야기할 수 있다. CO₂와 CH₄를 이용해 메탄올 생산을 하는 플라즈마-촉매 반응에서 그림20에 나와 있는 바와 같이 플라즈마만 사용하는 경우보다 오히려 전환 성능이 더 떨어지는 것을 볼 수 있는데, 라디칼이 플라즈마에 의해 촉매에 가장 유효하게 작용할 수 있는 화학 종임을 생각하면, 반응과 촉매의 설계에 고려해야 할 중요한 포인트가 될 수 있다. 물론, 금속 촉매에서의 라디칼 포집이 반응으로 연계되어 오히려 흡착능을 향상시킨 것과 같은 효과를 가져올 수도 있기 때문에 모든 가능성에 대한 검토가 필요하다.

그림19. 금속 촉매 사용 시 플라즈마 단독 반응보다 메탄올 생산율이 더 저하되는 결과



* 출처: Annemie Bogaerts et al. (2025)

그림20. 서로 다른 BET를 가지는 SBA-15 support 구조체를 사용한 플라즈마-촉매 반응에서의 에너지 효율 변화



* 출처: 저자 작성

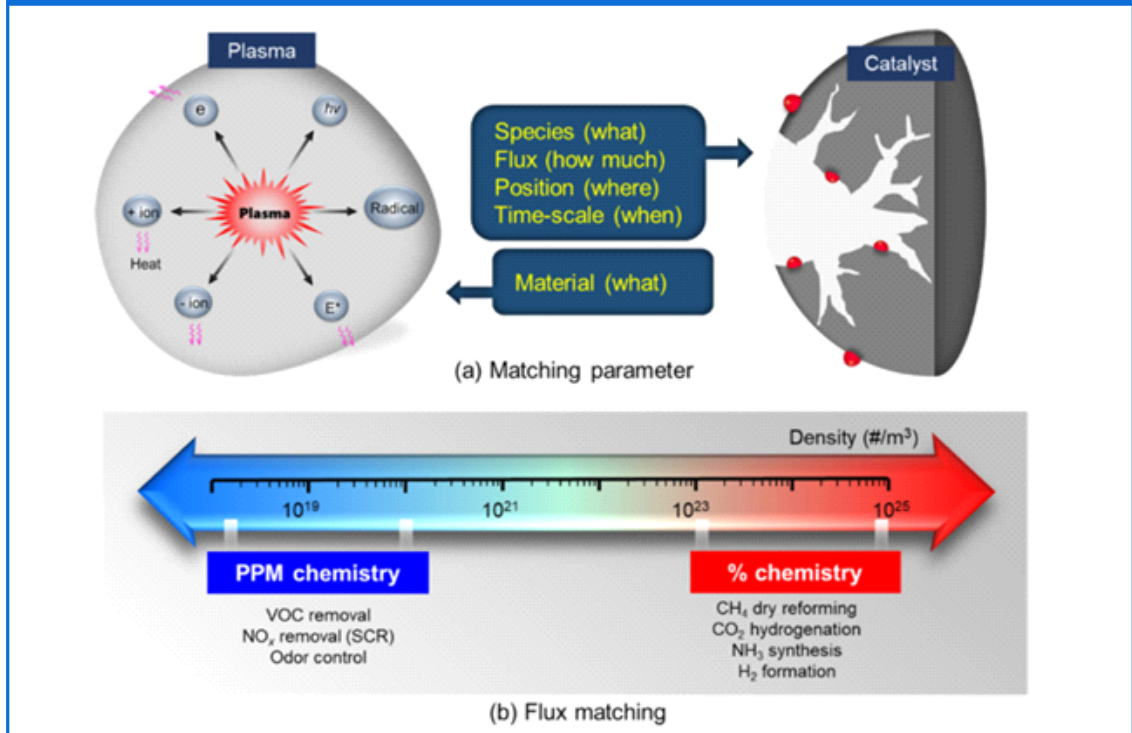
촉매 또는 support 물질의 porosity도 방전에 영향을 줄 수 있는데, 국소적인 기하적 형상에 의한 전기장의 집중, charge accumulation을 위한 더 큰 면적의 제공과 같은 형태로 기여할 수 있게 된다. 실제 서로 다른 비표면적을 가지는 SBA 15 물질들에 대한 메탄 전환 반응 결과에서 porosity에 따라 공급 전력당 메탄 전환율의 차이가 발생하는 것을 관찰할 수 있다.

4. 플라즈마-촉매 반응의 전망

4.1. 에너지 효율의 문제

앞서 논의된 바와 같이 플라즈마-촉매 반응에 있어 플라즈마와 촉매의 서로 다른 특성과 플라즈마 발생상의 특성등을 고려하여 플라즈마와 촉매를 융합해서 얻을 수 있는 이점이 있는지의 여부를 판단하고 적용을 해야 한다. 이 과정에서 가장 중요한 요인 중의 하나는 에너지 효율이다. 에너지 효율에 대한 판단은 플라즈마-촉매 방식의 적용이 가져오는 효과가 무엇인지에 대한 이해에 바탕 하고 있어야 한다. 플라즈마-촉매 공정을 적용하는 대상이 앞서 말한 것처럼 당초에는 주로 저농도의 오염물질을 제거하는 환경 공정을 중심으로 진행이 되어 오다가 최근 sustainability에 대한 주제로 전환을 해 가고 있다. 이렇게 되면 반응의 대상물의 농도 범위가 ppb 단위에서 % 단위로 변화하게 되며, 이로 인해 플라즈마-촉매 공정의 반응 mechanism 이 과연 % 단위의 반응물에 적합한 것인지 고려를 해야 한다. 플라즈마는 비평형 현상이며, 플라즈마가 만들어 내는 화학종은 기본적으로 농도가 높지가 않다. 특히 플라즈마-촉매 반응에 많이 활용되는 DBD와 같은 저온 플라즈마일수록 플라즈마가 만들어 내는 전자, 이온과 같은 1차 활성종의 농도는 더 낮아진다.

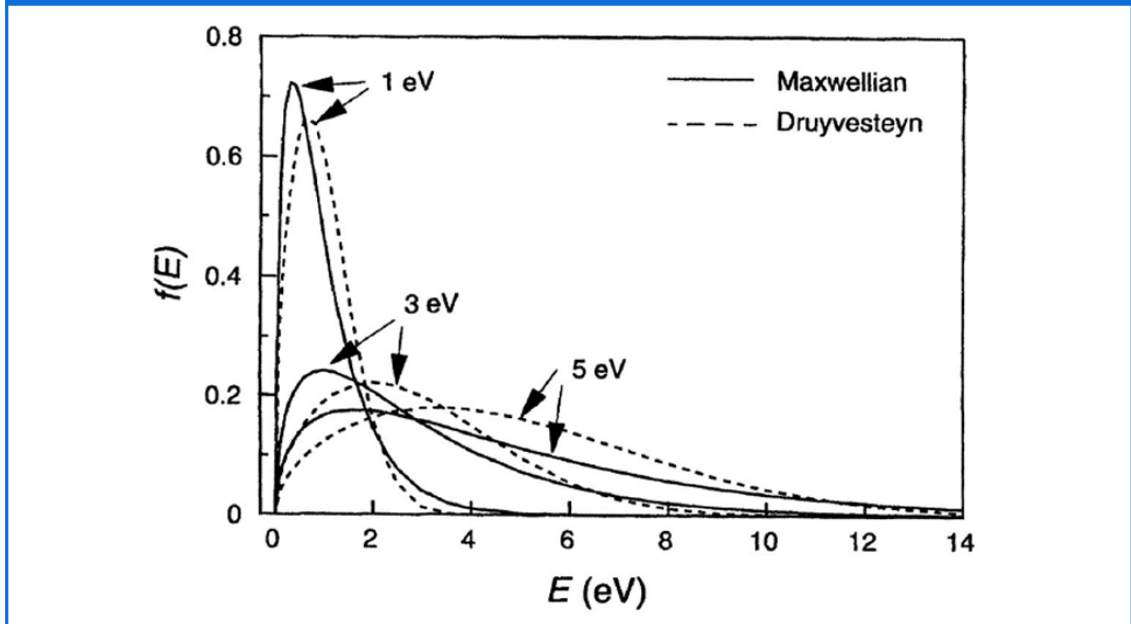
그림21. 플라즈마-촉매 공정의 응용 분야에 따른 대상물 특성 차이



* 출처: Hyun-Ha Kim et al. (2021)

따라서 플라즈마 적용의 전략은 가능한 밀도가 높은 활성종을 반응에 활용할 수 있도록 하는 것이고, 이는 앞서 논의된 바와 같이 라디컬 기반의 반응 혹은 진동여기(vibrationally excited) 화학종을 활용하는 것이다. 플라즈마 발생 과정에서 진동 여기는 주로 1eV 이하의 에너지를 가지는 전자들에 의해 생성되는 것과 전자의 에너지 분포가 그림22처럼 낮은 에너지 Level에 집중되어 있는 것을 고려하면, 높은 농도의 대상물을 처리하기 위해서는 가능한 높은 농도로 생성이 가능한 진동 여기 화학종과 연계된 반응을 활용하는 것이 가장 유리한 접근 방법이 된다.

그림22. 플라즈마 발생 시 전자의 에너지 분포



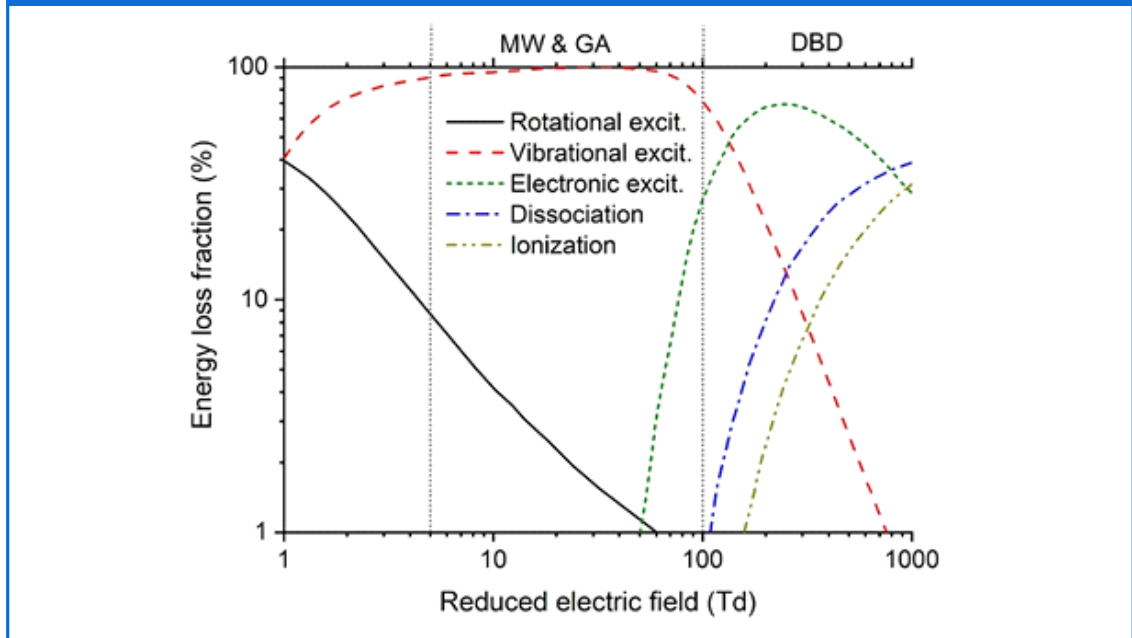
* 출처: Grill, A. (1994)

일반적인 전자 에너지 분포와 더불어 실제 플라즈마 발생 시에 전자로부터의 에너지 전달을 통해 방전 기체, 방전 방식 등에 따라 플라즈마 내에서 만들어지는 다양한 활성종들의 에너지 분포가 달라지게 된다. 방식에 따라 차이가 발생할 수 있지만 통상 Reduced electric field 기준으로 수십 Td 정도의 값을 가지는 조건에서 진동 여기 화학종으로 배분되는 에너지가 가장 많은 것으로 알려져 있다. (그림23) 플라즈마 소스에 따라 발생 시의 Reduced electric field 값이 다른 특성을 가지고 있다. 통상 DBD와 같은 저온 플라즈마의 경우 Reduced electric field 가 100 이상의 값을 주로 가지는 것을 고려하면 진동 여기 화학종을 활용하려 할 경우 DBD 와 같은 저온 플라즈마는 융합 반응의 에너지 효율성을 고려할 때 적절한 선택이 아닐 수 있음을 이해할 수 있다.

이러한 이유로 sustainability와 관련한 주제들에서 최근 활발하게 연구되고 있는 고농도의 대상물에 대한 반응과 관련된 플라즈마-촉매 공정은 warm plasma 소스를 사용하는 것이 에너지 효율면에서 가장 적절한 선택이라고 할 수 있다. 특히 warm plasma 소스를 사용하는 경우 전자충돌로 야기되는 고에너지 화학종들과 더불어 필연적으로 비교적 높은 기체 온도의

플라즈마 생성물이 촉매로 공급되기 때문에 이 현열에 기반하여 촉매의 열적 활성화를 활용할 수 있는 여지가 생긴다. 하지만, 같은 이유로 또 한 편으로는 진동 여기종과 같은 화학종의 활용으로 인한 융합 효과가 촉매의 증가한 활성에 비해 상대적으로 크게 드러나지 않을 수 있는 원인이 될 수도 있다.

그림23. Reduced electric field에 따라 전자에너지 전달을 통한 화학종 생성의 상대적 경로



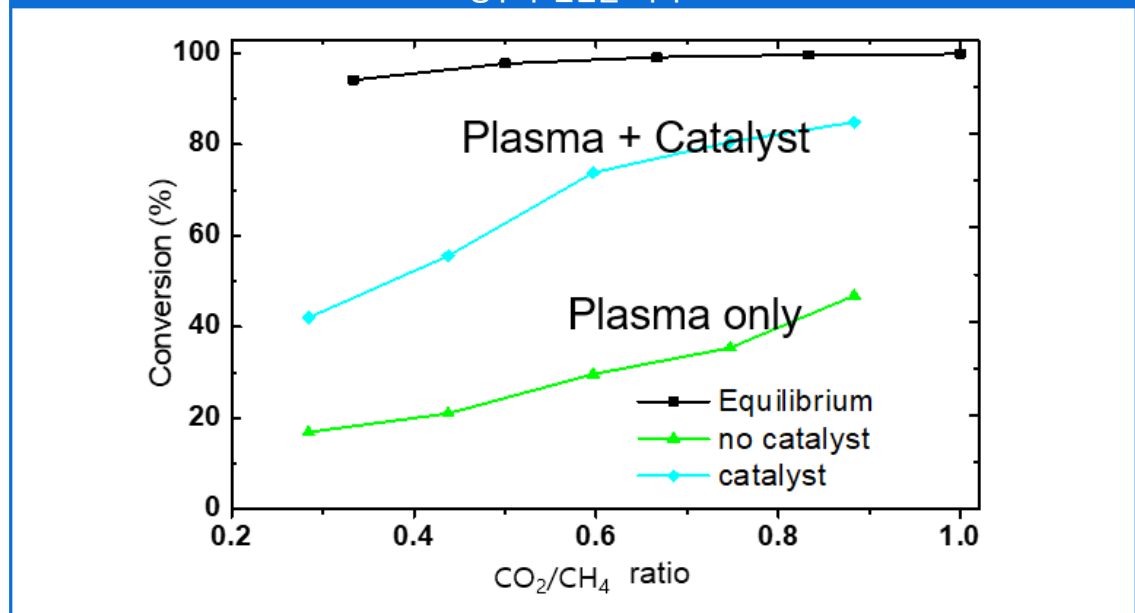
* 출처: Annemie Bogaerts et al. (2020)

지금까지의 모든 논의에서 플라즈마-촉매 융합 반응은 단순히 플라즈마와 촉매가 융합되는 것으로 여겨지는데, 이 모든 과정에서, 플라즈마 단독 혹은 촉매 단독 공정에 대비해서 플라즈마-촉매를 융합하는 것이, 플라즈마에 촉매를 더하는 것과 촉매에 플라즈마를 더하는 것이 서로 다른 관점이 발생한다는 점을 기억해야 한다. 플라즈마에 촉매를 더하는 관점에서는 거의 모든 경우에 플라즈마 단독으로 반응을 진행하는 것보다 촉매를 더하는 것이 크든 작든 에너지 사용상의 효율을 높일 수 있는 방안이 된다. 그림24에 나와 있는 메탄 개질 반응의 경우에서 확인할 수 있듯이 단순히 플라즈마 후단에 촉매를 위치시키는 것만으로도 전환율을 두 배 이상 높게 만들 수 있다. 플라즈마에 의해 발생한 생성물 기체 엔탈피를 촉매를 통해 회수하

여 활용하는 형태의 구조가 되니, 무조건 플라즈마 단독 반응보다 효율이 높아질 수 밖에 없다.

하지만, 촉매 반응에 플라즈마를 더한다는 관점으로 보면, 플라즈마를 더하는 것은 거의 모든 경우에 에너지 효율의 손실을 가져온다. 플라즈마를 발생시키기 위해 사용하는 전력 소요를 고려할 경우, 비평형 현상인 플라즈마의 발생은 태생적으로 에너지의 효율이 높지 않기 때문이다. 즉 플라즈마-촉매 반응을 위해 기존 촉매 반응기에 100만㎞의 전기에너지를 공급하면, 이중 열 형태로 변환되는 에너지는 열손실과 발생 특성에 따라 다르겠지만, 대략 60~80%의 플라즈마에 의한 열전환 효율, 그리고, 이에 더해 30~40%의 열손실을 고려하면 절반 이하 정도의 에너지가 열로 전환되는 것으로 볼 수 있다. 이 경우 이 전력을 플라즈마 발생이 아니라 촉매 반응기의 승온으로 일반적인 전열 가열하게 되면 훨씬 작은 전력 사용량으로 플라즈마-촉매 반응의 효율 이상의 성능을 얻을 수 있게 된다.

그림24. 메탄 개질 반응에서 플라즈마 단독, post plasma 방식의 플라즈마-촉매 반응을 수행할 경우의 전환율 차이



* 출처: 저자 작성

보통 플라즈마 공정에서 투입 에너지를 대표하는 파라미터로 사용하는 SEI (Specific Energy Input, kJ/L) 값을 보면, 저온 플라즈마 기반의 플라즈마-촉매 반응기는 주로 수십~수백 kJ/L 범위의 값을 가진다. SEI는 기상의 반응물 1L에 어느 정도의 전기에너지가 공급되었는가의 의미를 가진다. 수십 kJ/L의 에너지는 단순히 계산했을 때 공기 1L를 수만 K 승온시킬 수 있는 매우 큰 에너지이다. 이 정도의 에너지를 추가로 투입해서 촉매 반응의 전환율을 2배로 만든다고 해도 에너지 사용 측면에서는 의미가 없는 일이 된다. 즉 플라즈마-촉매 반응을 적용하는 것이 기존 촉매 반응과 동일한 생산물을 얻기 위한 것이라면, 플라즈마-촉매 융합 반응을 적용하는 것이 과연 적합한 것인지 면밀하게 검토해야 한다.

3 플라즈마-촉매 융합 기술의 효용성과 전망

앞서 논의된 바와 같이 플라즈마와 촉매의 융합은, 촉매 관점에서는 기본적으로 에너지 효율의 큰 숙제를 안고 있다. 이것을 해소할 수 있는 방법은 1) 기존의 촉매 반응의 적용 조건 변경, 2) 반응 경로의 변화를 통한 새로운 생성물 생산, 3) 에너지 효율에 독립적인 기능의 확보 등의 관점을 생각해 볼 수 있다.

❖ 촉매 반응의 적용 조건 변경

일반적으로 열화학 촉매는 평형상태의 지배를 받는다, 따라서 촉매가 기능을 하기 위해서는 적절한 온도 조건이 필요하다. 그런데 원하는 반응 생성물은 있는데 특정한 이유로 통상적인 촉매 반응을 얻을 수 없는 온도에서 반응을 일으켜야 하는 경우, 플라즈마-촉매 융합이 적절한 해결책이 될 수 있다. 이 경우 플라즈마 생성종을 통한 RDS 단계의 제거 등의 경로를 통

해 반응의 온도를 낮출 수 있다.

❖ 반응 경로의 변화

일반적으로 평형 조건이 결정하는 반응 조건에서, 비평형 현상에 기반한 에너지 상태를 가진 화학종이 공급되면, 기존의 촉매 반응에 의해 정의 되지 않았던 새로운 반응 경로를 생성하여, 일반적인 촉매 반응과 반응물은 같으나, 생성물이 다른 반응을 설계할 수 있다.

❖ 에너지 효율에 독립적인 기능

말 그대로 에너지 비용이 더 들어가더라도, 다른 방식으로 얻기가 어려운 특정한 반응 경로를 발굴하는 것이다. 오존의 경우 플라즈마 외에는 오존을 만들어 낼 수 있는 대안이 없다. 오존의 특성상 오존이 분해되지 않는 저온 조건에서 5.1 eV 정도로 산소 분자를 해리시킬 수 있을 정도의 높은 에너지를 가지는 화학종(전자)를 만들어 낼 수 있는 경로는 플라즈마가 유일하기 때문이다.

기존의 플라즈마-촉매 융합 반응은, 에너지 효율(공정비용)에 대한 엄밀한 검토가 생략된 채 반응의 활성 자체에 대한 변화를 중심으로 많은 연구들이 보고가 되어 왔다. 하지만 고도로 복합적인 상호작용을 하고 있는 플라즈마와 촉매의 반응 기작에 대해 충분히 이해하고 플라즈마와-촉매를 융합하는 반응을 설계한다면, 기존 평형 기반의 열화학 반응의 한계를 넘어 설 수 있는 비평형(플라즈마)기반의 새로운 공정 개발의 개념이 가능해 질 수 있을 것을 기대 된다.

플라즈마-촉매 반응 관련한 많은 연구들이 진행되고 있고, 좋은 Review 논문 또한 많이 있다. 최근의 연구는 플라즈마가 촉매 표면에서 야기하는 반응, 촉매 구조에 대해 미치는 영향 등에 대한 분자/원자 수준의 이해를 가지기 위한 노력들이 많이 진행되고 있으며 특히 재생전력의 확대와 더불어 전기에너지에 기반한 플라즈마의 활용이 좀 더 활발해질 것으로 기대가 된다.

저자소개

이대훈(Lee Dae Hoon)

- | | |
|-------------------------------|---|
| · KAIST 기계공학과 항공우주공학 학사·석사·박사 | · (現) 한국기계연구원 책임연구원
· (現) UST 융합시스템 교수
· (現) 고려대학교
첨단반도체공정장비인재양성사업단 겸임교수 |
|-------------------------------|---|

〈국외문헌〉

- 1) Annemie Bogaerts, Gabriele Centi, Volker Hessel, Evgeny Rebrov, Perspectives and Emerging Trends in Plasma Catalysis: Facing the Challenge of Chemical Production Electrification, ChemCatChem 2025, 17, e202401938
- 2) Annemie Bogaerts, Xin Tu, Christopher j Whitehead, Gabriele Centi, Leon Lefferts, Olivier Guaitella, Federico Azzolina-Jury, Hyun-Ha Kim, Anthony B Murphy, William F Schneider, Tomohiro Nozaki, Jason C Hicks, Antoine Rousseau, Frederic Thevenet, Ahmed Khacef, Maria Carreon, The 2020 plasma catalysis roadmap, Journal of Physics D: Applied Physics, 53; 44, 2020, 443001
- 3) Asif Hussain Khoja, Arslan Mazhar, Faisal Saleem, Muhammad Taqi Mehran, Salman Raza Naqvi, Mustafa Anwar, Sehar Shakir, Nor Aishah Saidina Amin, Muhammad Bilal Sajid, Recent developments in catalyst synthesis using DBD plasma for reforming applications, International Journal of Hydrogen Energy, 46, 29, 2021, 15367–15388
- 4) Grill, A. (1994) Cold Plasma Materials Fabrication: From Fundamentals to Applications; Wiley-IEEE Press: New York
- 5) G Leofanti, M Padovan, G Tozzola, B Venturelli, Surface area and pore texture of catalysts, Catalysis Today, 41, 1–3, 1998, 207–219,
- 6) Hyun-Ha Kim, Atsushi Ogata, Shigeru Futamura, Oxygen partial pressure-dependent behavior of various catalysts for the total oxidation of VOCs using cycled system of adsorption and oxygen plasma, Applied Catalysis B: Environmental, 79, 4, 2008, 356–367,
- 7) Hyun-Ha Kim, Yoshiyuki Teramoto, Nobuaki Negishi, Atsushi Ogata, A

multidisciplinary approach to understand the interactions of nonthermal plasma and catalyst: A review, *Catalysis Today*, 256, 1, 2015, Pages 13–22,

- 8) Hyun-Ha Kim, Teramoto Y, Ogata A, Takagi H, Nanba T. Plasma catalysis for environmental treatment and energy applications. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 2016, 36(1): 45–72
- 9) Li, Ming and Liu, Jing-Lin and Li, Xiao-Song and Wen, Xiao-Qiong and Zhu, Ai-Min, Revisiting gas temperature in dielectric barrier discharge (DBD): an unsolved problem of plasma catalysis, *Plasma Sources Science and Technology*, 34; 4, 2025, 045014
- 10) Nozaki, T., Chen, X., Kim, DY. et al. Combination of DBD and Catalysts for CH₄ and CO₂ Conversion: Basics and Applications. *Plasma Chem Plasma Process* 43, 1385–1410 (2023).
- 11) Nozaki Tomohiro, Miyazaki Yu, Unno Yasuko, Okazaki Ken, Energy distribution and heat transfer mechanisms in atmospheric pressure non-equilibrium plasmas, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 34; 23, 2001, 3383
- 12) Shihab, M and Elgendy, A T and Korolov, I and Derzsi, A and Schulze, J and Eremin, D and Mussenbrock, T and Donko, Z and Brinkmann, R P, Kinetic simulation of the sheath dynamics in the intermediate radio frequency regime, *Plasma Sources Science and Technology*, 22; 5, 2013, 055013
- 13) Taegyu Kim, Sungkwon Jo, Young-Hoon Song, Dae Hoon Lee, Synergetic mechanism of methanol&-steam reforming reaction in a catalytic reactor with electric discharges, *Applied Energy*, 113, 2014, 1692–1699,
- 14) Taegyu Kim, Dae Hoon Lee, Sungkwon Jo, Sung Hyun Pyun, Kwan-Tae Kim, Young-Hoon Song, Mechanism of the Accelerated Reduction of an Oxidized Metal Catalyst under Electric Discharge, *ChemCatChem*, 8; 4,

2016, 685–689

- 15) Smentkowski V.S., Yates J.T., Jr. THE ADSORPTION OF OXYGEN ON Fe(II) IN THE TEMPERATURE RANGE OF 90 TO 920 K, Surface Science 232 (1990) 113–128
- 16) Ye, Z.; Giraudon, J.-M.; De Geyter, N.; Morent, R.; Lamonier, J.-F. The Design of MnO_x Based Catalyst in Post-Plasma Catalysis Configuration for Toluene Abatement. Catalysts 2018, 8, 91.

융합정책

대한민국
지역혁신클러스터 정책과
향후 방향성

이 규 택

전북테크노파크 원장

1 서론

1. 개요

대한민국은 지속적인 경제 성장을 이루기 위해 지역 기반의 혁신을 중요한 정책 과제로 삼고 있다. 20세기 후반부터 서울 및 수도권 중심으로 산업 집중이 심화되면서 지역 간 경제적 격차가 발생하였고, 이는 국가 경쟁력에도 영향을 미치는 요소로 작용했다. 이에 따라 정부는 균형 잡힌 발전을 이루기 위해 지역혁신을 촉진하는 다양한 정책을 추진해 왔다.

지역혁신클러스터(Regional Innovation Cluster) 정책은 특정 지역 내 기업, 대학, 연구기관, 정부 등이 협력하여 혁신 생태계를 조성하고, 지역 특화 산업을 육성하는 것을 목표로 한다. 이를 통해 지역 경제를 활성화하고, 장기적으로 국가 전체의 혁신 역량을 강화하는 것이 핵심이다. 대한민국은 글로벌 경쟁력을 확보하고 4차 산업혁명 시대에 대비하기 위해 지속적으로 지역혁신클러스터 정책을 발전시키고 있다.

대한민국의 지역혁신 정책은 글로벌 트렌드와도 맞물려 있다. 세계 각국은 혁신 중심의 산업 구조를 구축하기 위해 다양한 형태의 클러스터 정책을 도입하고 있으며, 특히 유럽연합(EU)의 스마트 특성화 전략(Smart Specialization Strategy), 미국의 실리콘밸리 및 보스턴 바이오 클러스터 사례는 대한민국의 정책 설계에도 많은 영향을 주고 있다. 이러한 글로벌 흐름 속에서 대한민국은 지역의 특수성을 고려한 맞춤형 혁신 클러스터 모델을 정립하려는 노력을 기울이고 있다.

대표적인 지역혁신 정책으로는 국가혁신클러스터, 스마트특성화 사업, 규제자유특구, 기획발전특구, 창업지원 정책, 산학연 협력 강화 등이 있으며, 각 정책은 지역의 특성과 산업 환경을 고려하여 설계되었다. 이러한 정책들은 단순한 산업 지원을 넘어 지역의 지속 가능한 성장 기반을 조성하는 데 중점을 둔다. 특히, 수도권에 집중된 인적·물적 자원을 지역으로 분산시키고, 지역 내 중소기업 및 스타트업의 경쟁력을 강화하는 것이 주요 목표이다. 이를 위해 지역 대학 및 연구기관과 협력하여 지역 산업을 고도화하고, 혁신 기술을 통한 신성장 동력을 확보하는 전략이 추진되고 있다.

하지만 이러한 정책이 성공적으로 정착하기 위해서는 여러 가지 도전 과제를 해결해야 한다. 수도권과 비수도권 간의 불균형 문제, 협력 생태계 구축의 어려움, 지속적인 정책 지원 부족, 글로벌 시장과의 연계성 부족 등의 문제를 극복하는 것이 필요하다. 또한, 정부의 지원뿐만 아니라 민간 기업, 연구기관, 지방자치단체가 긴밀히 협력하여 지역의 특성을 반영한 맞춤형 전략을 수립하는 것이 필수적이다.

특히, 기존의 정책이 가지는 한계를 보완하고 지속가능성을 높이기 위해서는 몇 가지 중요한 요소를 고려해야 한다. 첫째, 단기적인 정책 지원이 아닌 장기적인 비전과 로드맵을 기반으로 한 지속 가능한 정책 추진이 필요하다. 둘째, 지역 내 기업과 연구기관이 자발적으로 협력할 수 있도록 생태계를 조성하는 것이 중요하다. 단순히 정부 주도의 지원이 아니라, 기업과 대학, 연구소가 함께 성장할 수 있는 구조를 만들어야 한다. 셋째, 지역혁신클러스터가 글로벌 시장에서 경쟁력을 확보할 수 있도록 해외 네트워크를 강화하고 국제 협력을 증진해야 한다. 이를 통해 지역 클러스터가 내수 중심의 지원을 넘어 글로벌 시장에서도 성장할 수 있는 기회를 마련해야 한다.

본 리뷰에서는 우선 지역혁신클러스터의 개념 및 이론적 배경을 살펴본 후, EU와 미국의 지역혁신클러스터 정책을 파악해 보겠다. 그리고 대한민국의 주요 지역혁신클러스터 정책을 소개하고, 이에 따른 도전 과제 및 향후 방향성을 심층적으로 분석하고자 한다. 이를 통해 지역혁신이 국가 경제 성장에 미치는 영향을 살펴보고, 효과적인 정책 추진을 위한 방안을 모색하는 것이 본 리뷰의 주요 목적이다. 대한민국의 지역혁신 정책이 단순한 산업 육성을 넘어, 지속 가능한 경제 생태계를 구축하는 데 어떤 역할을 할 수 있는지 논의할 것이다.

2 지역혁신클러스터란?

2. 지역혁신클러스터의 개념 및 이론적 배경

2.1. 지역혁신클러스터의 정의

지역혁신클러스터(Regional Innovation Cluster)는 특정 지역을 중심으로 기업, 대학, 연구기관, 공공기관 등이 협력하여 혁신을 촉진하고, 지역의 산업 경쟁력을 강화하는 시스템을 의미한다. 이는 단순한 산업 집적(agglomeration)이 아니라 지속적인 혁신 활동을 통해 경제적 부가가치를 창출하는 구조라는 점에서 차별화된다.

핵심 요소로는 다음의 네 가지를 들 수 있다.

- 공간적 집중: 특정 지역 내 산업과 연구기관이 밀집
- 혁신 네트워크: 기업, 대학, 연구소 간의 협력 및 지식 공유
- 정부 및 공공기관의 지원: 정책적·재정적 지원을 통한 활성화
- 창업 및 기업 육성: 신생 기업(스타트업)과 기존 기업의 동반 성장

지역혁신클러스터는 단순한 산업클러스터와는 달리, 단순 생산 집적지가 아니라 혁신을 지속적으로 창출하는 구조라는 특징을 가지고 있다.

2.2. 주요 이론적 배경

오늘날 세계 각국은 혁신을 바탕으로 지역 경제의 경쟁력을 강화하고자 한다. 이에 따라 대한민국 역시 지역혁신클러스터 정책을 추진하며 지역 기반의 지속 가능한 성장 모델을 모색하고 있다. 지역혁신클러스터란 단순히 기업들이 한곳에 모여 있는 산업 집적지를 의미하는 것이 아니라, 기업, 연구기관, 대학, 정부 등이 상호 협력하며 지속적으로 혁신을 창출하는 구조를 뜻한다. 그렇다면 지역혁신클러스터는 어떠한 이론적 배경을 바탕으로 형성되었으며, 이를 통해 우리는 무엇을 시사받을 수 있을까?

2.1.1. 산업클러스터 이론

우선, 산업클러스터 이론(Industrial Cluster Theory)을 살펴볼 필요가 있다. 하버드대학의 마이클 포터(Michael Porter)는 산업클러스터가 기업의 경쟁력을 높이고 혁신을 촉진하는 핵심 요소라고 주장했다. 포터의 다이아몬드 모델에 따르면, 기업이 특정 지역에 모이면 경쟁과 협력이 동시에 이루어지며 혁신이 더욱 가속화된다. 즉, 클러스터 내에서는 경쟁 기업 간의 선의의 경쟁이 발전을 유도하는 동시에, 협력업체 및 연구기관과의 연계를 통해 혁신 역량이 극대화된다는 것이다. 실리콘밸리와 같은 세계적 혁신 클러스터가 탄생한 배경에도 이러한 원리가 작용했다.

2.1.2. 혁신 시스템 이론

하지만 산업클러스터 이론만으로는 지역혁신클러스터의 모든 특성을 설명하기 어렵다. 단순한 기업 집적이 아니라 지속적인 연구개발(R&D)과 기술혁신이 이루어지는 구조를 설명하려면 혁신 시스템 이론(Innovation System Theory)을 고려해야 한다. 크리스토퍼 프리먼(Christopher Freeman)과 루드비히 룬트발(Bengt-Ake Lundvall)이 제시한 국가혁신시스템(NIS, National Innovation System) 개념은 기업과 연구기관, 대학, 정부가 하나의 혁신

생태계를 이루어야 한다는 점을 강조한다. 이를 지역 차원으로 확장한 것이 지역혁신시스템(RIS, Regional Innovation System)이다. 지역혁신시스템에서는 기업과 연구기관, 대학이 네트워크를 구축하고 지속적인 기술 개발과 인재 육성을 통해 혁신을 주도해야 한다.

이러한 이론을 바탕으로 볼 때, 대한민국의 지역혁신클러스터는 단순한 산업단지를 넘어 지속 가능한 혁신 생태계를 조성하는 방향으로 나아가야 한다. 판교 테크노밸리, 대덕연구개발특구와 같은 사례가 혁신을 촉진하는 대표적인 모델이라 할 수 있다. 그러나 여전히 기업·대학·연구소 간의 유기적 협력이 부족하고, 지역 간 혁신 격차가 심화되는 문제도 존재한다. 따라서 정부는 단순한 산업 육성을 넘어 지역 내 혁신 네트워크를 강화하고, 장기적인 기술 개발과 인재 양성을 위한 체계적인 지원책을 마련해야 할 것이다.

결론적으로, 지역혁신클러스터는 단순한 산업 집적이 아니라 지속 가능한 혁신 시스템을 구축하는 과정이어야 한다. 산업클러스터 이론과 혁신 시스템 이론에서 보듯이, 기업 간의 경쟁과 협력, 연구기관과의 연계, 정부의 정책적 지원이 맞물려야만 성공적인 지역혁신클러스터가 형성될 수 있다(〈표.1〉). 대한민국이 미래 산업 경쟁력을 높이기 위해서는 이러한 이론적 배경을 바탕으로 한 장기적인 지역혁신 전략이 반드시 필요하다.

표 1. 산업클러스터 이론과 혁신 시스템 이론의 비교

	산업클러스터 이론	혁신 시스템 이론
주요 개념	기업들이 특정 지역에 집적하면서 경쟁과 협력을 통해 혁신을 촉진	기업, 연구소, 대학, 정부 등이 협력하여 혁신 생태계를 구축
주요 학자	마이클 포터 (Michael Porter)	크리스토퍼 프리먼 (Christopher Freeman), 룬트발 (Bengt-Åke Lundvall)
핵심 요소	① 기업 간 경쟁과 협력 ② 공급망과 지원 산업의 연계 ③ 정부 정책 및 인프라	① 기업-대학-연구소 간 협력 ② 혁신 네트워크 구축 ③ 정부의 연구개발(R&D) 지원
대표 이론	다이아몬드 모델 (Diamond Model)	국가혁신시스템(NIS), 지역혁신시스템(RIS)
주요 사례	- 미국 실리콘밸리 - 독일 자동차 클러스터 - 한국 판교 테크노밸리	- 한국 대덕연구개발특구 - 스웨덴 혁신 시스템 - 핀란드 헬싱키 지역혁신시스템
대한민국 적용 방향	- 산업별 특화 클러스터 조성 - 기업 간 협업 촉진 및 경쟁력 강화	- 산학연 협력 확대 - 지역 맞춤형 R&D 및 인재 양성 정책

3 EU 지역혁신클러스터 정책

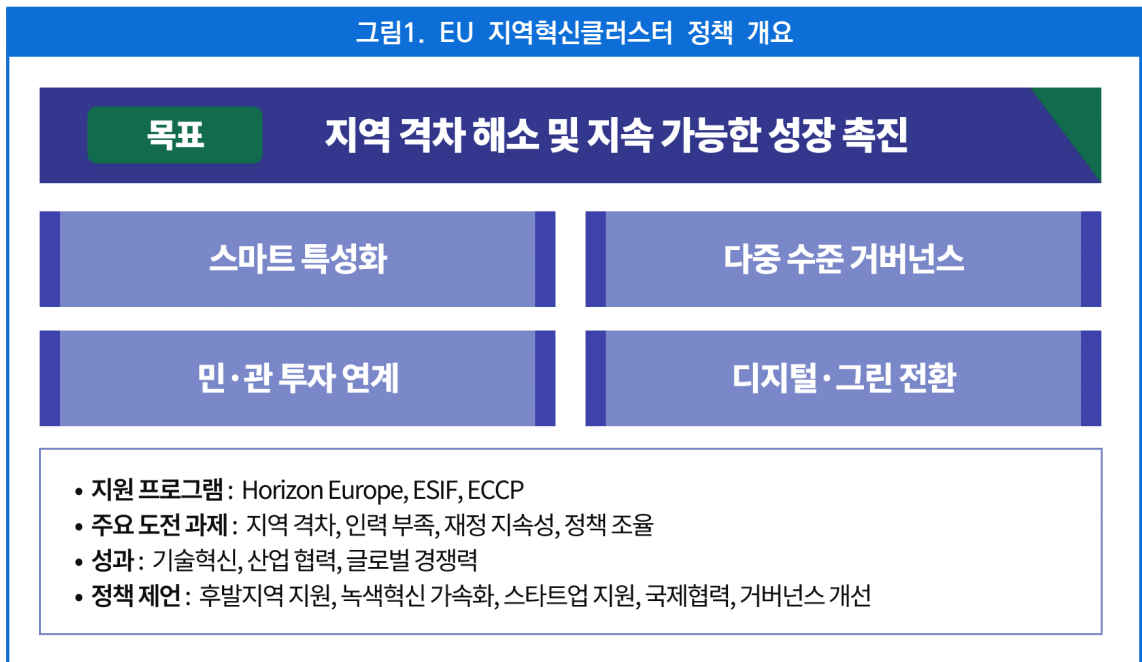
3. EU 지역혁신클러스터 정책 개요

유럽연합(EU)은 경제 성장과 지속 가능한 발전을 촉진하기 위해 지역혁신클러스터(Regional Innovation Clusters) 정책을 적극적으로 추진하고 있다. 지역혁신클러스터는 특정 지역 내 기업, 대학, 연구기관, 정부 등이 협력하여 혁신 생태계를 조성하고, 지역 특화 산업을 육성하는 것을 목표로 한다. 이러한 정책은 EU의 경제통합 및 균형 발전 전략과 맞물려 있으며, 특히 21세기 들어 디지털 전환, 녹색 경제, 글로벌 경쟁력 강화 등의 과제를 해결하기 위해 더욱 강조되고 있다.

EU의 지역혁신 정책은 2000년대 초반부터 본격화되었으며, 유럽위원회(European Commission)가 이를 주도하고 있다. 특히 '스마트 특성화 전략(Smart Specialization Strategy, S3)'을 통해 지역별 강점을 극대화하는 방식으로 혁신을 촉진하고 있으며, Horizon Europe, European Cluster Collaboration Platform(ECCP) 등의 프로그램을 통해 구체적인 지원과 협력을 제공하고 있다. 이러한 정책들은 유럽 내에서 혁신 네트워크를 강화하고, 지역 간 격차를 줄이는 데 중요한 역할을 하고 있다.

본 챕터에서는 EU의 주요 지역혁신클러스터 정책을 간단히 분석하고, 그 성과 및 도전 과제, 향후 방향성에 대해 논의하고자 한다. 이를 통해 EU의 지역혁신 전략이 글로벌 경제 환경 속에서 어떻게 작용하는지 살펴보고, 유사한 정책을 고려하는 국가들에게 시사점을 제공할 것이다.

그림1. EU 지역혁신클러스터 정책 개요



* 출처: 저자 작성

3.1. EU 지역혁신클러스터 정책

EU의 지역혁신클러스터 정책은 유럽 내 지역 간 경제적 격차를 해소하고, 지속 가능한 성장을 촉진하기 위해 마련된 전략적 접근 방식이다. 이 정책의 핵심 목표는 지역별 강점을 극대화하고, 연구 및 개발(R&D), 기업, 공공기관 간의 협력을 통해 혁신을 촉진하는 것이다.

3.1.1. 정책 배경

EU는 2000년대 초반부터 리스본 전략(Lisbon Strategy)을 통해 지식 기반 경제로의 전환을 강조하며 혁신 클러스터 정책을 추진했다. 2010년 유럽 2020 전략(Europe 2020 Strategy)에서 지속 가능한 성장, 포용적 경제 발전, 스마트 혁신을 중심으로 한 정책 방향을 제시했다. 최근에는 유럽 그린딜(European Green Deal)과 디지털 전환 전략을 반영하여 지속가능성과 첨단 기술 중심의 혁신을 강화하고 있다.

3.1.2. 주요 원칙 및 전략

- 스마트 특성화 전략: 각 지역이 자체적인 비교우위를 식별하고 해당 분야에서 혁신을 주도 하도록 장려한다.
- 다중 수준 거버넌스(Multi-Level Governance): EU, 회원국 정부, 지역 정부, 산업, 학계 등이 협력하여 혁신 정책을 수립하고 실행한다.
- 공공 및 민간 투자 연계: 유럽 지역개발기금(ERDF, European Regional Development Fund), Horizon Europe 등의 기금을 활용하여 혁신 프로젝트를 지원하고 민간 투자를 유도한다.
- 디지털 및 녹색 전환 촉진: 인공지능(AI), 빅데이터, 재생에너지 등의 분야에서 지역 클러스 터의 혁신 역량을 강화한다.

3.1.3. 지원 메커니즘 및 자금 조달

- 유럽 구조 및 투자 기금(ESIF, European Structural and Investment Funds): 유럽 지역개발기금과 유럽 사회기금(ESF)을 통해 지역 혁신 프로젝트를 지원한다.
- Horizon Europe: 연구 및 혁신 프로그램을 통해 기술 개발과 협력 프로젝트를 촉진한다.
- European Cluster Collaboration Platform(ECCP): EU 내 클러스터 간 네트워크를 구축 하고 협력을 촉진하는 플랫폼으로 기능한다.

3.1.4. 주요 사례

- 독일의 바덴뷔르템베르크 자동차 혁신 클러스터: 자동차 및 모빌리티 혁신을 주도하는 대표적인 사례로, 연구기관과 산업이 협력하여 전기차 및 자율주행 기술을 개발하고 있다.
- 스페인의 바스크 지역 제조 혁신 클러스터: 스마트 제조 기술 및 산업 디지털화를 선도하는 지역으로, EU 지원을 받아 첨단 제조업 혁신을 추진하고 있다.
- 스웨덴의 바이오 기술 클러스터: 생명과학 및 바이오테크 산업을 중심으로 혁신을 촉진하는 사례로, 글로벌 바이오 기업 및 연구소와 협력하고 있다.
- EU의 지역혁신클러스터 정책은 지속적인 경제 성장과 글로벌 경쟁력을 유지하기 위한 필수적인 전략으로 자리 잡고 있다. 이후 내용에서는 이러한 정책을 구체화하는 주요 프로그램과 그 성과 및 과제에 대해 다룰 것이다.

3.2. 주요 정책 프로그램

3.2.1. 스마트 특성화 전략

- EU 지역별로 강점을 갖춘 산업 및 기술 분야를 선별하여 지원하는 전략.
- 지역별 혁신 역량을 극대화하고, 중복 투자 방지를 목표로 함.
- 연구개발(R&D) 및 기술 상용화를 촉진하며, 지역 경제 발전을 견인.

3.2.2. Horizon Europe

- EU의 주요 연구 및 혁신 프로그램으로, 2021-2027년까지 약 950억 유로의 예산 배정.
- 녹색 전환, 디지털 혁신, 보건 및 보안 등 다양한 분야에서 혁신 프로젝트 지원.
- 기업, 대학, 연구소 간 협업 촉진 및 글로벌 파트너십 강화.

3.2.3. European Cluster Collaboration Platform(ECCP)

- EU 내 혁신 클러스터 간 협업 및 네트워크 구축을 지원하는 온라인 플랫폼.
- 중소기업(SME) 지원, 기술 이전 및 파트너십 형성을 촉진.
- 클러스터 간 국제 협력 및 시장 진출 기회를 확대.

3.2.4. 기타 EU 차원의 지원 프로그램

- Digital Europe Programme: 디지털 혁신을 촉진하고, 인공지능(AI) 및 사이버보안 기술 개발을 지원.
- 유럽 지역개발기금(ERDF): 지역 내 경제 불균형을 완화하고, 혁신 인프라를 구축하기 위한 기금 제공.
- InvestEU: 중소기업 및 스타트업을 위한 재정 지원 프로그램으로, 혁신적인 기업의 성장 촉진.

3.3. 주요 성과 및 도전 과제

3.3.1. 주요 성과

- 경제적 파급 효과: EU 내 여러 혁신 클러스터가 지역 경제 성장에 기여하고 있으며, 신기술 개발과 일자리 창출 효과를 만들고 있음.
- 디지털 및 녹색 전환 촉진: 클러스터 정책을 통해 인공지능(AI), 빅데이터, 신재생에너지 등의 분야에서 유럽이 글로벌 리더로 자리 잡을 수 있도록 지원.
- 산업 협력 강화: 클러스터를 통해 중소기업과 대기업, 연구기관 간 협력이 강화되었으며, 새로운 시장 개척이 가능해짐.
- 글로벌 경쟁력 향상: 유럽 내 혁신 클러스터들이 국제 무대에서 경쟁력을 확보하며, 글로벌 기업과의 협력이 증가함.

3.3.2. 도전 과제

- 지역 간 격차: 혁신 클러스터가 집중된 선진 지역과 그렇지 않은 지역 간의 경제적 불균형이 여전히 존재함.
- 기술 격차 및 인력 부족: 고급 기술을 보유한 인재 및 전문 인력의 부족이 일부 클러스터의 성장에 제약으로 작용.
- 지속 가능한 재정 지원: EU 기금 의존도가 높은 일부 클러스터에서는 장기적인 자금 조달 문제 발생 가능성.
- 정책 조율 및 조정: 개별 국가 및 지역의 정책과 EU 차원의 정책 간 조율이 필요한 상황이며, 협력 강화 필요.

3.4. 향후 방향성 및 정책 제언

3.4.1. 지역 간 균형 발전을 위한 지원 강화

- EU 내에서 혁신 클러스터가 일부 선진 지역에 집중되는 문제를 해소하기 위해 후발 지역에 대한 맞춤형 지원을 확대해야 함.
- 구조적 자금 지원과 더불어 인프라 구축, 기술 이전, 전문 인력 양성 프로그램을 더욱 강화할 필요가 있음.

3.4.2. 디지털 및 녹색 혁신의 가속화

- AI, 빅데이터, 사물인터넷(IoT) 등의 디지털 기술을 활용하여 혁신 클러스터의 경쟁력을 더욱 강화해야 함.
- EU의 탄소 중립 목표(Net Zero 2050)와 연계하여 지속 가능한 에너지, 친환경 제조, 순환 경제와 관련된 클러스터 지원을 확대할 필요가 있음.

3.4.3. 스타트업 및 중소기업 지원 확대

- 클러스터 내 중소기업이 혁신의 중심이 될 수 있도록 연구개발(R&D) 자금 지원과 기술 상용화 프로그램을 적극 추진해야 함.
- 민관 협력을 통한 벤처캐피털 투자 확대, 국제 네트워크 구축 등의 지원이 필요함.

3.4.4. EU 회원국 및 글로벌 협력 강화

- 개별 회원국 간 클러스터 협력뿐만 아니라, 글로벌 시장과의 연계를 확대하여 국제적인 기술 협력과 무역 기회를 창출해야 함.
- 미국, 일본, 한국 등과의 혁신 클러스터 협력을 강화하여 공동 연구개발(R&D) 및 기술 교류를 촉진할 필요가 있음.

3.4.5. 정책 거버넌스 및 평가 체계 개선

- 클러스터 정책의 효과성을 지속적으로 모니터링하고, 데이터 기반의 성과 평가 시스템을 구축하여 정책 효율성을 높여야 함.
- 지역 혁신 성과를 정량적으로 측정하고, 베스트 프랙티스(Best Practice)를 공유하는 플랫폼을 구축하여 정책 개선을 위한 피드백을 수집해야 함.

3.4.6. 지속 가능한 재정 조달 방안 모색

- EU 기금에 의존하는 구조에서 벗어나, 민간 투자 유치 및 공공-민간 파트너십(PPP, Public-Private Partnership)을 활용한 지속 가능한 재정 모델을 구축해야 함.
- 클러스터 내 기업과 연구기관이 자체적으로 수익을 창출할 수 있는 비즈니스 모델을 개발할 필요가 있음.

4. 미국 지역혁신클러스터 정책 개요

미국은 혁신과 기업가정신을 기반으로 한 경제 성장을 지속적으로 추진해 왔으며, 지역혁신 클러스터(RIC, Regional Innovation Clusters) 정책은 이러한 성장 전략의 핵심 요소 중 하나이다. 지역혁신클러스터는 특정 지역 내 기업, 대학, 연구기관, 정부 기관 등이 협력하여 혁신 생태계를 조성하고, 산업 경쟁력을 강화하는 정책적 접근 방식이다. 이러한 클러스터 정책은 실리콘밸리, 보스턴의 퀴알스퀘어, 노스캐롤라이나의 리서치 트라이앵글 등 여러 성공적인 사례를 통해 미국 경제 성장의 중요한 축으로 자리 잡았다.

미국의 지역혁신클러스터 정책은 연방 정부, 주정부, 민간 부문의 협력을 바탕으로 추진되며, 특히 중소기업청(SBA, Small Business Administration), 상무부(DoC, Department of Commerce), 국립과학재단(NSF, National Science Foundation), 에너지부(DoE, United States Department of Energy) 등이 주요 정책 집행 기관으로 활동하고 있다. 대표적인 프로그램으로는 '지역혁신클러스터 이니셔티브(SBA RIC Initiative)', '제조업 혁신 네트워크(Manufacturing USA)', '산업혁신클러스터 프로그램(EDA, Economic Development Administration)' 등이 있다.

본 챕터에서는 미국의 지역혁신클러스터 정책을 간단히 살펴보고, 주요 정책 프로그램, 성과 및 도전 과제, 향후 방향성 등을 분석하고자 한다.

그림2. 미국 지역혁신클러스터 정책 개요



* 출처: 저자 작성

4.1. 미국 지역혁신클러스터 정책

미국의 지역혁신클러스터 정책은 주로 다음과 같은 목표를 중심으로 추진된다.

- 산업 경쟁력 강화: 첨단 기술 및 제조업 분야에서 미국의 글로벌 경쟁력을 유지하고 강화하기 위해 클러스터 정책을 활용.
- 중소기업 성장 지원: 중소기업의 기술 개발과 시장 진출을 돕기 위한 연구개발(R&D) 지원 및 네트워크 구축.
- 지역 경제 활성화: 특정 지역의 경제적 특성을 반영한 맞춤형 클러스터 조성을 통해 일자리 창출과 경제 활성화 도모.

- 산업-학계-정부 간 협력 촉진: 혁신 생태계 내에서 대학, 연구기관, 기업, 정부 기관 간 협력 강화.
- 디지털 및 지속 가능한 경제 전환: AI, 빅데이터, 친환경 기술 등 4차 산업혁명 및 탄소 중립 관련 기술의 지역 내 확산 지원.

4.2. 주요 정책 프로그램

4.2.1. SBA 지역혁신클러스터 이니셔티브(SBA RIC Initiative)

- 미국 중소기업청(SBA)이 주관하는 프로그램으로, 중소기업과 스타트업이 클러스터 내에서 기술혁신과 시장 확장을 할 수 있도록 지원.
- 주요 지원 내용: 네트워킹, 시장 조사, 기술 상용화, 정부 조달 기회 제공.

4.2.2. 제조업 혁신 네트워크(Manufacturing USA)

- 미국 제조업의 혁신을 촉진하기 위해 2014년 설립된 네트워크로, 첨단 제조 기술 연구 및 상용화를 지원.
- 주요 분야: 첨단 재료, 로봇 공학, 스마트 제조, 바이오 제조 등.

4.2.3. 산업혁신클러스터 프로그램(EDA)

- 미 상무부 산하 경제개발청(EDA)이 주관하는 프로그램으로, 지역 경제 발전과 일자리 창출을 위해 특정 산업클러스터를 육성.
- 주요 지원 내용: 인프라 투자, 스타트업 지원, 연구 개발 촉진.

4.2.4. 국립과학재단(NSF) 엔지니어링 리서치 센터(ERC) 프로그램

- NSF가 주관하는 혁신 연구 허브로, 대학과 산업체 간 협력을 통해 최첨단 기술 개발을 촉진.
- 대표 사례: MIT, 스탠퍼드, UC 버클리 등이 참여하는 첨단 기술 연구 프로젝트.

4.2.5. 에너지부(DoE)의 클린에너지 혁신 허브

- 신재생 에너지 및 탄소 저감 기술 개발을 위한 지역혁신 허브 조성.
- 주요 기술 분야: 태양광, 풍력, 에너지 저장 시스템, 스마트 그리드 등.

4.3. 주요 성과 및 도전 과제

4.3.1. 주요 성과

- 글로벌 기술 리더십 확보: 실리콘밸리, 보스턴 바이오테크 클러스터 등의 성공 사례를 통해 미국이 세계적인 기술 허브로 자리 잡음.
- 일자리 창출 및 경제 성장: 제조업 혁신 네트워크 등을 통한 신산업 창출과 지역 경제 활성화.
- 스타트업 및 중소기업 성장 지원: 4.1.1. SBA 지역혁신클러스터 이니셔티브를 통한 수많은 스타트업의 성장 및 글로벌 시장 진출.

4.3.2. 도전 과제

- 지역 간 격차: 일부 대도시에 혁신 클러스터가 집중되면서 중소도시 및 농촌 지역과의 격차 심화.
- 기술 격차: AI, 5G, 반도체 등 첨단 기술 분야에서 일부 기업과 연구소에 기술이 집중되는 문제.
- 재정적 지속가능성: 연방정부 지원이 지속적으로 유지될 수 있을지에 대한 불확실성 존재.

4.4. 향후 방향성 및 정책 제언

4.4.1. 지역 간 균형 발전 지원 강화

- 중소도시 및 농촌 지역에도 혁신 클러스터를 확대할 수 있는 맞춤형 정책 필요.

4.4.2. AI 및 디지털 전환 가속화

- 데이터 경제 활성화 및 AI 기반 스마트 클러스터 조성을 위한 인프라 투자 확대.

4.4.3. 민관 협력 및 글로벌 연계 강화

- 글로벌 협력 강화를 위해 EU, 일본, 한국 등과 공동 연구 및 혁신 프로젝트 추진.

4.4.4. 지속 가능한 재정 지원 모델 구축

- 민간 투자 유치 및 공공-민간 파트너십(PPP) 활성화를 통한 재정적 안정성 확보.

5. 대한민국 지역혁신클러스터 정책의 현황과 과제

대한민국은 지속적인 지역 균형 발전과 산업 경쟁력 강화를 위해 지역혁신클러스터 정책을 추진해왔다. 이러한 정책은 국가 전반의 혁신 역량을 제고하고 지역 간 격차를 해소하는 것을 목표로 한다. 대표적인 정책으로는 국가혁신클러스터, 스마트특성화 사업, 규제자유특구, 기회발전특구, 창업지원 정책, 산학연 협력 강화 등이 있으며, 정부와 지자체의 역할이 중요한 요소로 작용한다. 본 챕터에서는 대한민국 지역혁신클러스터 정책의 주요 내용과 성과를 살펴보고, 향후 개선 방향을 논의하고자 한다.

5.1. 주요 정책 개요

5.1.1. 국가혁신클러스터 정책

국가혁신클러스터는 지역별로 전략산업을 선정하고 기업, 대학, 연구기관 간 협력을 촉진하여 혁신 생태계를 조성하는 것을 목표로 한다. 이를 통해 지역 내 신산업 육성과 글로벌 경쟁력을 갖춘 산업 생태계를 구축하고자 한다. 대표적인 사례로는 대전의 바이오헬스 클러스터와 광주의 AI 기반 미래차 클러스터가 있다.

5.1.2. 스마트특성화 사업

스마트특성화 사업은 지역의 특화 산업을 선정하고, 이를 중심으로 R&D 및 사업화 지원을 집중적으로 제공하는 정책이다. 지역의 강점을 활용하여 경쟁력을 극대화하고자 하며, 주로 지방자치단체와 지역 연구기관의 협력을 통해 추진된다. 예를 들어, 부산의 해양바이오산업 육성 사업과 전북의 친환경 모빌리티 산업 특성화 사업이 있다.

5.1.3. 규제자유특구

규제자유특구는 신기술과 신산업의 발전을 저해하는 규제를 완화하여 기업들이 자유롭게 연구개발과 실증사업을 진행할 수 있도록 하는 제도이다. 대표적인 사례로 강원도의 디지털 헬스케어 특구, 대구의 물산업 특구, 제주도의 전기차 특구 등이 있다. 이러한 특구들은 해당 지역의 강점을 활용하여 신산업 육성을 촉진하고 있다.

5.1.4. 기회발전특구

기회발전특구는 수도권과 지방 간 불균형을 해소하고 지역 산업 활성화를 위해 마련된 제도로, 기업이 지역에 투자하는 경우 세제 혜택과 각종 행정 지원을 제공한다. 예를 들어, 전남의 신재생에너지 특구와 충남의 반도체 소재·부품 특구가 지정되어 관련 산업을 집중적으로 육성하고 있다.

5.1.5. 창업지원 정책

창업지원 정책은 지역 내 스타트업과 혁신 기업을 육성하기 위한 다양한 지원책을 포함한다. 예를 들어, 창조경제혁신센터를 통한 창업 보육, 스타트업 파크 조성, 모태펀드를 활용한 창업자금 지원 등이 있다. 인천 송도의 스타트업 파크는 글로벌 진출을 목표로 하는 혁신 기업들을 적극 지원하고 있다.

5.1.6. 산학연 협력 강화

산학연 협력 강화 정책은 지역 대학과 연구기관, 기업 간 협력을 통해 기술 이전과 신기술 개발을 촉진하는 것을 목표로 한다. 대표적인 사례로는 포항의 포스텍과 철강 기업 간의 공동 연구개발, 대전 카이스트와 벤처기업 간의 협력 프로그램이 있다. 또한 광역지자체별로 테크노파크가 지역의 CTO(Chief Technology Office, 최고기술경영자) 기관으로서 산학연 협력의 중심 역할을 하고 있다.

5.2. 정부 및 지자체의 역할

5.2.1. 중앙정부의 역할

중앙정부는 국가 단위의 산업 전략을 수립하고 정책적 지원을 총괄하는 역할을 한다.

- 정책 기획 및 조정: 국가 차원의 산업 전략과 연계하여 지역별 혁신 전략이 조화를 이루도록 조정한다.
- 재정 지원 및 인프라 구축: 연구개발(R&D) 투자와 각종 재정 지원을 통해 지역혁신클러스터가 원활히 운영될 수 있도록 한다.
- 규제 개혁 및 법·제도 정비: 규제자유특구 운영을 지원하고, 신산업 육성을 위한 법·제도를 정비하여 기업들이 혁신 활동을 자유롭게 수행할 수 있도록 한다.
- 기술 이전 및 글로벌 연계 강화: 국가 연구기관과 지역 산업 간 기술 이전을 촉진하고, 해외 기업 및 기관과 협력하여 글로벌 경쟁력을 확보한다.

5.2.2. 지방자치단체의 역할

지방자치단체는 지역 특성을 반영한 맞춤형 정책을 수립하고, 중앙정부와 기업 간 가교 역할을 수행한다.

- 지역 특화산업 발굴 및 육성: 해당 지역의 산업 환경과 강점을 고려하여 특화산업을 선정하고 육성하는 전략을 추진한다.
- 기업 지원 및 네트워크 구축: 지역 내 중소기업과 스타트업이 성장할 수 있도록 맞춤형 지원 프로그램을 운영하고, 대학 및 연구기관과의 협력을 촉진한다.
- 산업 인프라 조성: 산업단지 조성, 연구개발센터 설립 등 지역 내 혁신 인프라를 구축하여 기업의 정착을 돕는다.
- 인력 양성 및 교육 지원: 지역 내 우수 인재를 확보하고 육성하기 위해 대학 및 교육기관과 협력하여 맞춤형 인재 양성 프로그램을 운영한다.
- 정책 실행 및 성과 관리: 중앙정부와 협력하여 정책을 실행하고, 성과를 평가하여 지속적인 개선을 도모한다.

5.3. 주요 성과 및 한계

5.3.1. 주요 성과

지역혁신클러스터 정책을 통해 다음과 같은 성과가 나타나고 있다.

- 기술 창업 활성화: 규제자유특구 및 창업지원 정책을 통해 다수의 신생 기업이 창업하고 성장할 수 있는 환경이 조성되었다. 예를 들어, 대구 규제자유특구 내 자율주행 기업들이 성장하면서 관련 기술력이 크게 향상되었다.
- 산학연 협력 강화: 대학과 기업 간 협업을 통해 기술 이전과 공동 연구개발이 활발히 이루어지고 있다. 포스텍과 포항 철강산업의 협력 사례는 철강 신소재 개발의 대표적인 성공 사례로 꼽힌다.
- 지역 특화산업 육성: 스마트특성화 사업을 통해 지역별 특화산업이 성장하고 있다. 전북의 친환경 모빌리티 산업은 지역 자동차 부품 기업들과 협력하여 전기차 및 수소차 관련 부품 개발을 선도하고 있다.
- 고용 창출 및 경제 활성화: 기회발전특구를 통해 기업 유치가 활성화되면서 지역 내 일자리 창출 효과가 발생했다. 충남 반도체 소재·부품 특구에서는 반도체 관련 중소기업들이 지속적으로 증가하고 있다.

5.3.2. 주요 한계

많은 성과에도 불구하고 적지 않은 한계도 지적되고 있다.

- 수도권과 지방 간 격차 지속: 지역혁신클러스터 정책에도 불구하고 수도권과 지방 간 산업·경제 격차는 여전히 크다.
- 지속적인 재정 지원 부족: 초기 투자 이후 지속적인 지원이 부족하여 장기적 성장 동력이 약화될 가능성이 있다.
- 산학연 협력의 한계: 대학과 연구기관의 연구 성과가 실제 산업으로 연결되는 과정에서 많은 어려움이 존재한다.
- 기업 유치 및 정착의 어려움: 일부 지역에서는 인프라 부족 및 인력 수급 문제로 인해 기업이 지속적으로 정착하기 어려운 환경이 조성되고 있다.

5.4. 향후 방향성 및 정책 제언

대한민국의 지역혁신클러스터 정책은 국가 균형 발전과 미래 산업 경쟁력 강화를 위한 필수적인 전략이다. 다양한 정책이 추진되면서 기술 창업이 활성화되고, 산학연 협력이 강화되었으며, 지역 특화산업이 육성되는 성과를 거두었다. 그러나 수도권과 지방 간 격차 문제, 지속적인 재정 지원 부족, 기업 정착의 어려움 등 여전히 해결해야 할 과제들이 남아 있다.

향후 정책 방향으로서는 다음과 같은 개선이 필요하다.

- 지역 맞춤형 전략 강화: 지역의 특성과 산업 생태계를 반영한 차별화된 지원 정책을 수립해야 한다.
- 안정적인 재정 지원 확보: 장기적인 정책 지속성을 보장하기 위해 중앙정부와 지자체 간 협력 기반의 재정 지원 체계를 강화해야 한다.
- 산학연 협력 확대 및 실질적 성과 창출: 연구개발 성과가 실제 산업으로 연결될 수 있도록 기술 이전 및 상용화 지원을 강화해야 한다.
- 기업 유치 및 정착 지원 강화: 지방 기업에 대한 인센티브 확대와 주거·교육 환경 개선을 통해 기업과 인재의 지방 정착을 유도해야 한다.
- 디지털 및 친환경 산업 육성: 4차 산업혁명 및 탄소중립 시대에 대비한 스마트 혁신 기술과 친환경 산업을 전략적으로 육성해야 한다.

궁극적으로, 지역혁신클러스터가 지속 가능한 성장을 이루고 글로벌 경쟁력을 갖출 수 있도록 민관 협력을 더욱 강화해야 할 것이다.

6. 개요

전국의 테크노파크와 창조경제혁신센터는 지역 산업과 창업을 지원하는 핵심 기관들이다. 대한민국의 지역혁신클러스터에서 테크노파크와 창조경제혁신센터가 차지하는 비중이 크기 때문에 각각의 역할과 차이점을 정리해 볼 필요가 있다.

6.1. 대한민국 테크노파크

테크노파크(Technopark)는 지역 내 산업 혁신을 촉진하고 신기술 개발을 지원하는 산업 플랫폼으로서, 기업·대학·연구기관 간 협력을 강화하여 지역 산업의 경쟁력을 높이는 역할을 수행한다. 대한민국의 테크노파크는 1998년 정부 주도로 설립되었으며, 현재 전국 19개 지역에서 운영되고 있다. 테크노파크는 지역 특성에 맞는 산업 육성을 목표로 하며, 연구개발(R&D) 지원, 창업 보육, 기업 성장 지원 등의 다양한 기능을 수행한다.

6.1.1. 테크노파크의 역사

테크노파크는 1990년대 말 외환위기 이후 국가 경쟁력 강화를 위한 산업 혁신 전략의 일환으로 도입되었다. 정부는 지역 균형 발전과 기술 경쟁력 제고를 목표로 1998년 대덕 테크노파크를 시범적으로 조성한 후, 이를 전국적으로 확대하였다.

- 1998년: 대덕테크노파크 설립
- 2000년대 초반: 전국 주요 지역에 테크노파크 확산 (부산, 대구, 광주 등)
- 2010년대: 4차 산업혁명 대비 및 연구개발(R&D) 중심의 혁신 생태계 조성
- 2020년대 이후: 디지털 전환과 친환경 기술 개발 중심으로 확대

현재 테크노파크는 지역 산업 혁신의 거점으로 자리 잡고 있으며, 글로벌 기술 경쟁력을 갖춘 기업 육성을 위한 핵심적인 역할을 수행하고 있다.

6.1.2. 테크노파크의 목표

테크노파크의 주요 목표는 다음과 같다:

- 지역 혁신 생태계 구축: 지역별 특성에 맞는 신산업을 육성하고, 산업 전반의 혁신을 촉진한다.
- 중소기업 및 스타트업 지원: 창업 초기 기업의 연구개발과 시장 진입을 지원하며, 지속적인 성장을 돕는다.
- 산학연 협력 강화: 대학, 연구기관, 기업 간 협업을 촉진하여 기술 이전과 상용화를 지원한다.
- 신기술 개발 및 사업화 지원: 4차 산업혁명 기술을 적용한 혁신 제품과 서비스를 개발하고, 사업화를 촉진한다.
- 지역 균형 발전: 수도권과 지방 간 산업 격차를 줄이고, 지역별 특화 산업을 육성하여 경제 성장을 견인한다.

6.1.3. 운영 주체 및 조직 구조

테크노파크는 정부, 지자체, 대학, 연구기관, 기업이 협력하여 운영하는 비영리 법인 형태로 구성되어 있다.

- 중앙정부: 산업통상자원부(2018년까지) 및 중소벤처기업부(2019년부터)가 정책 기획 및 지원을 담당하며, 테크노파크의 운영 방향을 설정한다.
- 지방자치단체: 각 지역의 테크노파크 운영을 지원하고, 지역별 특화산업 육성을 위한 재정 및 행정적 지원을 제공한다.
- 대학 및 연구기관: 기술 개발 및 연구 협력을 수행하며, 기업과의 공동 연구 및 기술 이전을 추진한다.

- 기업 및 창업 지원 기관: 입주 기업을 대상으로 연구개발 및 사업화 지원을 제공하고, 네트워크 및 시장 진출을 지원한다.

6.1.4. 테크노파크의 주요 역할

테크노파크는 다양한 기능을 수행하며 지역 경제 활성화와 산업 경쟁력 강화를 위한 핵심 역할을 담당한다.

□ 창업 및 기업 지원

- 스타트업 및 중소기업의 기술 개발 및 사업화 지원
- 창업 보육 프로그램 운영 및 맞춤형 멘토링 제공
- 투자 유치 및 해외 진출 지원

□ 연구개발 및 기술 이전

- 첨단 기술 개발 및 시제품 제작 지원
- 대학 및 연구기관과 협력하여 기술 이전 촉진
- 산업별 연구개발(R&D) 클러스터 조성

□ 산업 생태계 조성

- 지역 특화산업 육성을 위한 연구 및 지원
- 산업 네트워크 구축 및 기업 간 협력 촉진
- 신산업 및 신기술 트렌드 조사 및 보급

□ 인프라 구축 및 운영

- 연구개발 시설 및 장비 지원
- 공동 실험실, 테스트베드, 기술 지원센터 운영
- 전문 인력 양성을 위한 교육 및 훈련 프로그램 제공

6.1.5. 주요 성과 및 향후 발전 방향

테크노파크의 주요 성과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 국내 주요 산업의 혁신 클러스터 역할 수행
- 다수의 기술 창업 및 스타트업 육성
- 지역산업 경쟁력 강화를 위한 연구개발 지원 확대
- 글로벌 기술 협력 및 해외 시장 진출 지원

테크노파크의 향후 발전 방향은 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 디지털 전환 가속화: AI, 빅데이터, IoT 등 첨단 기술을 활용한 연구개발 강화
- 지속 가능한 산업 생태계 구축: 친환경 및 탄소중립 기술 개발 및 적용 확대
- 지역 간 협력 강화: 테크노파크 간 연계를 통한 공동 연구 및 산업 육성 추진
- 기업 지원 프로그램 확대: 맞춤형 기업 성장 지원 및 글로벌 시장 진출 강화

테크노파크는 지역산업 혁신의 중심 역할을 수행하며, 기업 성장과 산업 발전을 위한 핵심적인 플랫폼으로 자리 잡고 있다. 향후 지속적인 지원과 혁신적인 운영을 통해 글로벌 경쟁력을 갖춘 산업 생태계를 구축하는 것이 중요하다. 정부, 지자체, 연구기관, 기업 간의 긴밀한 협력을 바탕으로 테크노파크의 역할을 더욱 강화할 필요가 있다. <표 2>는 전국 테크노파크의 특화 분야 및 주요 역할을 보여준다.

표 2. 전국 테크노파크의 특화 분야 및 주요 역할

	특화 분야	주요 역할
강원테크노파크	의료기기, 바이오헬스	의료기기 제품 개발 지원, 바이오헬스 산업 육성
경기대진테크노파크	환경, 에너지	친환경 기술 개발, 에너지 효율화 지원
경기테크노파크	반도체, 디스플레이	반도체 및 디스플레이 분야 기업 지원, 기술 개발 촉진
경남테크노파크	기계, 소재부품	기계 산업 기술 지원, 소재부품 기업 육성
광주테크노파크	광(光)산업, 에너지	광산업 기술 개발, 에너지 기업 지원
대구테크노파크	섬유, 의료	섬유 산업 혁신, 의료기기 기업 지원
대전테크노파크	ICT, 국방	ICT 기술 개발, 국방 산업 지원
부산테크노파크	해양, 조선	해양 기술 개발, 조선 산업 지원
서울테크노파크	IT, 바이오	IT 및 바이오 기업 지원, 기술 혁신 촉진
송도테크노파크	바이오, IT	바이오 기술 개발, IT 기업 지원
울산테크노파크	자동차, 조선	자동차 산업 기술 지원, 조선 기업 육성
전남테크노파크	에너지, 농수산	에너지 기술 개발, 농수산업 지원
전북테크노파크	농생명, 탄소소재	농생명 산업 지원, 탄소소재 기업 육성
제주테크노파크	청정에너지, 바이오	청정에너지 기술 개발, 바이오 산업 지원
충남테크노파크	디스플레이, 자동차	디스플레이 기술 개발, 자동차 산업 지원
충북테크노파크	바이오, 화장품	바이오 기술 개발, 화장품 산업 지원
포항테크노파크	철강, 소재	철강 기술 개발, 소재 기업 지원
세종테크노파크	스마트시티, 자율주행	스마트시티 기술 개발, 자율주행 산업 지원

6.2. 대한민국 창조경제혁신센터

창조경제혁신센터는 2013년 5월, 당시 박근혜 대통령의 창조경제 비전 아래 설립되었다. 창조경제는 기술혁신을 바탕으로 경제의 새로운 성장 동력을 창출하고, 창의적 아이디어를 실제 경제 활동으로 연결하려는 목표를 가지고 있었다. 이를 위해 정부는 창업과 혁신 생태계를 활성화하고, 다양한 산업 간 협력을 촉진하는 창조경제혁신센터를 전국에 설계하고 운영하기 시작했다.

6.2.1. 창조경제혁신센터의 역사

2008년 글로벌 금융위기 이후, 대한민국은 경제 성장 둔화와 함께 새로운 경제 모델에 대한 필요성이 커졌다. 이에 따라 창조경제는 혁신적인 기술과 창의적 아이디어를 통해 경제 성장을 이루겠다는 비전으로 제시되었고, 이에 대한 구체적인 실행 계획이 창조경제혁신센터의 설립으로 이어졌다. 정부는 창조경제의 핵심 기조로 ‘융합’, ‘창의성’, ‘기술 혁신’을 내세우며, 기존의 산업 구조에서 벗어나 혁신적인 창업 생태계를 통해 경제 성장과 고용 창출을 목표로 삼았다.

2013년 첫 창조경제혁신센터는 서울을 비롯한 17개 시·도에 걸쳐 총 17개 센터가 설립되었다. 창조경제혁신센터는 각 지역의 특성을 반영한 창업 지원과 혁신 사업을 추진하며, 대학, 연구소, 기업 등과의 협력을 통해 산업의 경쟁력을 강화하고, 창업과 일자리 창출에 중요한 역할을 맡았다. 초창기에는 정부 주도의 지원과 정책적 관심이 중심이었으며, 점차 민간과의 협력 확대, 지역 특화 산업과의 연계가 이루어졌다.

창조경제혁신센터는 설립 초기 다양한 정책과 프로그램을 통해 창업과 혁신을 지원했다. 이후 2015년에는 ‘창조경제’의 개념을 보다 구체화하고, 이를 통해 새로운 산업 생태계를 구축하는 방향으로 발전했다. 혁신센터는 기술 창업, 창업자금 지원, 멘토링, 글로벌 진출 등을 지원하며 기업 성장을 돕는 중요한 플랫폼 역할을 했다. 점차 정부의 직접적인 지원에서 민간 자본 및 다양한 기관과의 협력 관계를 통해 더 큰 성과를 만들어가고 있다.

6.2.2. 창조경제혁신센터의 목표

창조경제혁신센터는 대한민국 경제의 지속 가능한 성장을 위해 여러 가지 중요한 목표를 설정하고 운영된다.

- 창조경제혁신센터는 창업과 기업 혁신을 활성화하여 창의적인 아이디어를 경제적 가치로 전환시키는 역할을 한다. 이를 위해 창업 교육, 멘토링, 투자 지원 등을 통해 창업 생태계를 강화하고, 창의적이고 혁신적인 아이디어가 현실화될 수 있도록 지원한다.
- 창조경제혁신센터는 다양한 분야의 기술 융합을 통해 새로운 산업을 창출하는 것을 목표로 한다. ICT 기술과 바이오, 헬스케어, 제조업 등의 융합을 통해 새로운 제품과 서비스를 창출하고, 지역 특화 산업을 발전시키며, 국가 경제에 기여한다.
- 창조경제혁신센터는 각 지역의 특성에 맞는 창업 및 혁신 생태계를 구축하여 지역 경제 발전을 촉진하고, 수도권과 지방 간의 경제적 격차를 해소하는 데 기여한다. 이를 위해 지역 기업과 연계된 창업지원과 인프라 구축을 통해 지역 경제를 활성화한다.
- 창조경제혁신센터는 글로벌 시장으로의 진출을 돕는 역할도 수행한다. 해외 진출을 원하는 스타트업과 중소기업에 대해 글로벌 네트워크와 파트너십을 제공하고, 국제적인 비즈니스 기회를 창출한다.

6.2.3. 운영 주체 및 조직 구조

창조경제혁신센터는 주로 정부 주도로 운영되지만, 민간과의 협력 체계를 통해 실질적인 성과를 도출하는 방식으로 운영된다.

- 중앙정부: 중앙정부는 창조경제혁신센터의 주요 정책과 전략을 수립하고, 각 지역 센터의 활동을 지원한다. 중소벤처기업부가 주요 부처로 창조경제 관련 정책을 기획하고, 창업과 혁신 지원을 위한 예산과 재정적 지원을 제공한다. 정부는 창조경제혁신센터의 운영 방침을 설정하고, 각 지역 센터의 성과를 관리한다.

- 지방자치단체: 각 지역의 창조경제혁신센터는 지방자치단체와 협력하여 지역 특성에 맞는 창업지원과 산업 발전을 도모한다. 지방자치단체는 창조경제혁신센터의 운영에 필요한 재정적, 행정적 지원을 제공하며, 지역 기업과의 네트워크 구축 및 협력 활동을 지원한다.
- 민간 기업과 대학: 민간 기업과 대학은 창조경제혁신센터의 주요 협력 파트너로서, 창업 생태계 활성화와 산업 혁신을 위한 중요한 역할을 한다. 민간 기업은 자금 지원, 기술 지원 및 멘토링을 제공하며, 대학은 기술 연구와 창업 교육을 통해 인재를 양성하고 창업 활성화를 돕는다.
- 창업지원 기관: 중소기업진흥공단, 한국벤처투자 등 창업과 관련된 지원 기관들도 창조경제혁신센터와 협력하여 창업자금 지원, 창업 교육, 멘토링, 투자 유치 등의 활동을 진행한다.

6.1.4. 창조경제혁신센터의 주요 역할

창조경제혁신센터는 창업과 혁신을 지원하는 다양한 역할을 수행한다.

□ 창업 보육 및 창업 지원

창업 보육 프로그램을 운영하여 창업 초기 기업들이 안정적으로 성장할 수 있도록 돕는다. 창업자들에게 필요한 공간, 교육, 멘토링, 자금 지원을 제공하며, 창업자가 창업 초기 단계에서 겪을 수 있는 어려움을 해결하기 위해 다양한 서비스를 제공한다.

□ 기술 개발 및 혁신 지원

다양한 분야에서 기술 개발과 혁신을 지원한다. 창업자들이 창업 아이템을 상용화할 수 있도록 R&D 지원을 제공하고, 대학 및 연구기관과의 협력을 통해 연구개발 성과를 산업에 적용할 수 있도록 돕는다.

□ 글로벌 진출 지원

국내 기업이 글로벌 시장에 진출할 수 있도록 다양한 지원을 한다. 글로벌 전시회 및 박람회 참가 지원, 해외 진출을 위한 컨설팅 및 현지 네트워크 구축을 통해 기업의 해외 진출을 촉진한다.

□ 산업 네트워크 구축

지역 내외 기업, 연구기관, 대학, 투자자들과의 네트워크를 통해 기업 간 협업과 기술 교류를 촉진한다. 이를 통해 산업 간 융합과 혁신적인 아이디어가 창출될 수 있는 환경을 마련한다.

□ 투자 유치 및 자금 지원

창업 기업과 스타트업에 대한 자금 지원을 강화하고, 민간 투자자들과의 연결을 통해 투자 유치 활동을 지원한다. 다양한 창업지원 프로그램을 통해 창업자가 필요한 자금을 확보할 수 있도록 돕는다.

6.1.5. 주요 성과 및 향후 발전 방향

창조경제혁신센터는 창업과 혁신을 지원하고, 지역 경제 발전과 글로벌 진출을 촉진하는 중요한 역할을 수행하는 플랫폼이다. 설립 초기에는 정부 주도로 많은 성과를 이루었지만, 지금은 민간과의 협력을 강화하고, 지역 특화 산업을 발굴하며, 4차 산업혁명에 대응하는 창업 및 기술혁신 생태계를 구축하는 데 중요한 기여를 하고 있다. 향후 창조경제혁신센터가 더욱 효과적으로 기능하기 위해서는 지역 특성에 맞춘 맞춤형 지원과, 민간 기업과의 협력 확대가 필요하며, 창업 및 기술혁신의 글로벌 경쟁력을 높이는 방향으로 발전해야 할 것이다. <표.3>은 전국 창조경제혁신센터의 특화 분야 및 주요 역할을 보여준다.

표 3. 전국 창조경제혁신센터의 특화 분야 및 주요 역할

	특화 분야	주요 역할
강원창조경제혁신센터	관광, 바이오	관광 및 바이오 산업 스타트업 지원
경남창조경제혁신센터	기계, 소재부품	기계 산업 및 소재부품 스타트업 지원
경북창조경제혁신센터	전자정보기기, 자동차부품	전자기기 및 자동차 부품 산업 스타트업 육성
광주창조경제혁신센터	스마트 가전, 에너지	스마트 가전 및 에너지 분야 스타트업 육성
대구창조경제혁신센터	패션, 기계·자동차 부품	패션 및 기계·자동차 부품 산업의 고도화 추진
대전창조경제혁신센터	ICT, 국방	ICT 및 국방 산업 스타트업 지원
부산창조경제혁신센터	해양, 물류	해양 산업 및 물류 스타트업 육성, 글로벌 물류 네트워크 구축
서울창조경제혁신센터	문화 콘텐츠, 미디어	문화 콘텐츠 및 미디어 분야 스타트업 지원, 글로벌 진출 지원
세종창조경제혁신센터	스마트시티, 자율주행	스마트시티 및 자율주행 기술 스타트업 지원
울산창조경제혁신센터	조선, 자동차	조선 및 자동차 산업 스타트업 육성
인천창조경제혁신센터	물류, 바이오	물류 혁신 및 바이오 산업 스타트업 지원
전남창조경제혁신센터	에너지, 농수산	에너지 및 농수산업 스타트업 지원
전북창조경제혁신센터	농생명, 탄소소재	농생명 및 탄소소재 산업 스타트업 육성
충북창조경제혁신센터	바이오, 화장품	바이오 및 화장품 산업 스타트업 육성
충남창조경제혁신센터	디스플레이, 자동차	디스플레이 및 자동차 산업 스타트업 지원
경기창조경제혁신센터	ICT, 스마트 디바이스	ICT 및 스마트 디바이스 분야 스타트업 육성
제주창조경제혁신센터	관광, 스마트팜	관광 및 스마트팜 분야 스타트업 육성

6.3. 테크노파크 vs 창조경제혁신센터 비교

테크노파크와 창조경제혁신센터는 각각 지역 산업 혁신을 촉진하고 스타트업 및 중소기업 지원을 목적으로 한 기관이지만, 그 운영 구조와 목표, 특화 분야에서 차이를 보인다. 이 두 기관은 모두 지역 경제 활성화와 산업 생태계 발전을 위해 중요한 역할을 하고 있으며, 서로 다른 방식으로 해당 목표를 달성하고자 한다.

6.3.1. 운영 주체와 목표

- 테크노파크는 주로 지자체가 주도하며, 각 지역의 산업 특성을 반영한 맞춤형 지원을 제공한다. 정부와 지자체의 협력을 통해 산업의 기술적 지원과 함께 기업과 연구소, 대학교가 협력하여 산업 발전을 도모한다.
- 창조경제혁신센터는 중앙정부와 민간 기업의 협력으로 이루어지며, 각 지역의 창업 환경을 개선하고, 창업 아이디어가 시장에 진입할 수 있도록 돕는 역할을 한다. 특히, 민간 기업과의 협력 강화에 중점을 두고 있으며, 창업자에게 창업 자금과 시장 진입을 위한 다양한 지원을 제공한다.

6.3.2. 지원 대상 및 주요 사업

- 테크노파크는 기술혁신 및 기업 육성에 집중한다. 각 지역의 산업 특화 분야에 맞는 연구개발(R&D), 기술 지원, 생산성 향상, 기업 간 네트워크 구축 등을 지원한다.
- 창조경제혁신센터는 스타트업과 창업자를 대상으로 한 지원을 강화한다. 창업자에게는 창업 보육, 창업자금 지원, 글로벌 진출을 위한 네트워크 및 멘토링을 제공한다. 창업 아이템과 관련된 기술 지원뿐만 아니라, 시장 분석, 글로벌 시장 진출 등도 주요 사업으로 다룬다.

6.3.3. 지역 특화 및 글로벌 진출

- 테크노파크는 지역 특화 산업에 집중하며, 각 지역의 산업 특성에 맞는 기술 개발을 촉진한다. 예를 들어, 바이오, 반도체, IT 등의 산업에 대해 기술적인 지원을 강화하고, 지역 내 기업들이 글로벌 시장에서도 경쟁력을 가질 수 있도록 돕는다.
- 창조경제혁신센터는 글로벌 창업지원에 큰 비중을 두고 있다. 스타트업들이 해외 시장에 진출할 수 있도록 다양한 글로벌 네트워크를 제공하고, 해외 진출을 위한 전략적 파트너십을 유도한다.

테크노파크와 창조경제혁신센터는 각기 다른 역할을 수행하면서도, 지역 경제 활성화와 산업 혁신이라는 공통된 목표를 가지고 있다. 테크노파크는 주로 기술혁신 및 중소기업 지원을 통한 산업 경쟁력 강화를 목표로 하며, 창조경제혁신센터는 창업 생태계 활성화와 스타트업의 성장 지원을 중점적으로 다룬다. 두 기관은 상호 보완적으로 협력하며, 각 지역의 특성에 맞춘 지원을 통해 대한민국의 산업 경쟁력을 강화하고 있다. <표.4>는 테크노파크와 창조경제혁신센터의 비교표이다.

표 4. 테크노파크와 창조경제혁신센터의 비교

	테크노파크	창조경제혁신센터
목표	지역 산업 경쟁력 강화 및 기술 혁신 촉진	창업 생태계 활성화 및 스타트업 지원
운영 주체	주로 지자체 및 공공기관	중앙정부 및 민간 기업 협력
주요 역할	기술 개발 지원, 기업 육성, 산업클러스터 구축	창업자 지원, 창업 생태계 구축, 글로벌 진출 지원
지원 대상	중소기업, 기술 혁신 기업	스타트업, 창업자
주요 사업	기술 지원, R&D, 기업 네트워크 구축	창업 보육, 창업 자금 지원, 글로벌 네트워크 제공
특화 분야	지역 특화 산업 (바이오, 반도체, IT 등)	창업, ICT, 바이오, 에너지 등 다양한 창업 분야
글로벌 진출 지원	상대적으로 제한적 (주로 기술 지원 중심)	적극적 (글로벌 네트워크 제공, 해외 진출 전략 지원)
지원 방식	기술 개발 및 산업 생태계 구축	창업 보육 및 창업 아이템 사업화, 글로벌 진출 지원

7. 개요

대한민국의 지역혁신클러스터 정책은 국가균형발전과 혁신성장을 동시에 달성하려는 전략적 접근 방식이다. 그러나 정책이 추진되는 과정에서 지역 간 혁신 격차, 산학연 협력 부족, 기술 및 인재 유출, 지속 가능한 성장 모델 부재 등 여러 문제가 드러나고 있다. 이러한 도전 과제를 해결하지 않으면 지역혁신클러스터 정책의 장기적인 성과를 담보하기 어렵다. 이에 따라 현재 직면한 핵심 문제들을 분석하고, 해결 방향을 모색할 필요가 있다.

7.1. 지역 간 혁신 격차 및 불균형 문제

대한민국의 혁신 역량은 수도권과 일부 대도시에서 집중되어 있다. 판교 테크노밸리, 대덕연구개발특구 등은 비교적 성공적인 클러스터로 평가받지만, 지방 중소도시나 산업 구조가 취약한 지역은 여전히 혁신 역량이 부족하다.

7.1.1. 문제점

- 혁신 클러스터 집중: 수도권과 일부 대도시에서 혁신 자원이 집중됨
- 연구개발(R&D) 투자 격차: 수도권과 지방 간 R&D 투자 규모 차이 심각
- 산업 기반 차이: 수도권은 첨단산업, 지방은 전통 제조업 중심으로 혁신 속도 차이 발생

7.1.2. 사례

- 대덕연구개발특구(대전) vs 일반 지방 연구단지: 대덕특구는 연구개발 인프라가 체계적으로 조성된 반면, 지방 연구단지는 기업과 연구기관 간 연계가 부족하여 기술 상용화에 어려움

7.1.3. 해결 방안

- 지방 특화 산업 기반의 맞춤형 혁신 클러스터 육성(예: 부산 해양산업, 전북 농생명 등)
- 비수도권 R&D 예산 및 정책 지원 확대
- 기업 유치를 위한 세제 혜택 및 금융 지원 강화

7.2. 기업·대학·연구기관 간 협력 부족

지역혁신클러스터의 핵심은 기업, 대학, 연구기관 간의 긴밀한 협력이다. 하지만 현실적으로 이러한 협력이 원활하게 이루어지지 못하는 경우가 많다.

7.2.1. 문제점

- 기업의 기술 개발 역량 부족: 중소기업은 자체적인 연구개발 능력이 미흡하여 대학·연구소와 협력하려 해도 실질적인 성과 창출 어려움
- 대학·연구기관의 폐쇄적 연구 문화: 대학과 연구소는 논문과 특허 중심으로 운영되면서 기업과의 협력이 부족함
- 네트워크 부족: 기업과 대학·연구기관이 서로 소통할 플랫폼이나 협력 체계가 부실

7.2.2. 사례

- 한국 대학의 기술 이전율 저조: 국내 대학의 연구개발(R&D) 성과가 실제 기업으로 이전되는 비율이 선진국보다 낮음
- 스타트업과 연구기관 협력 미흡: 연구소의 혁신 기술이 스타트업으로 원활히 이전되지 않아 창업 활성화 저조

7.2.3. 해결 방안

- 기업-대학-연구소 간 공동 연구 프로젝트 확대(정부 지원 강화)
- 기술이전 및 기술사업화 전문 기관 활성화
- 산학연 협력 네트워크 구축 및 오픈이노베이션(개방형 혁신) 모델 도입

7.3. 기술 및 인재 유출 문제

기술과 인제는 혁신 클러스터의 핵심 요소다. 하지만 대한민국은 혁신 기술과 우수 인재가 수도권으로 집중되거나 해외로 유출되는 문제를 겪고 있다.

7.3.1. 문제점

- 지방의 우수 인재 수도권 집중: 지방 대학에서 인재를 양성해도 졸업 후 대부분 수도권 기업으로 취업
- 스타트업 및 중소기업 인재 부족: 지방의 혁신 기업이 우수 인력을 확보하기 어려움
- 기술 해외 유출: 한국에서 개발된 첨단 기술이 해외 기업으로 유출되는 사례 증가

7.3.2. 사례

- 반도체·바이오 인재 해외 유출: 글로벌 기업(예: 미국·중국 IT·바이오 기업)들이 높은 연봉을 제시하며 한국의 기술 인력을 적극 채용
- 지방 대학 졸업생의 수도권 취업률 증가: 지역 내 일자리 부족으로 인해 지방 대학 출신 인력의 70% 이상이 수도권으로 이동

7.3.3. 해결 방안

- 지역 내 고급 일자리 창출 및 지방 기업 경쟁력 강화
- 기술 보호를 위한 법·제도적 장치 마련
- 우수 인재 지방 정착을 위한 인센티브 정책(주거 지원, 생활 인프라 개선 등) 확대

7.4. 지속 가능한 성장 모델 부재

현재의 지역혁신클러스터 정책은 단기적인 정부 지원에 의존하는 경향이 크다. 장기적인 관점에서 지속 가능한 성장 모델을 구축하는 전략이 부족한 것이 문제다.

7.4.1. 문제점

- 정부 주도형 정책 한계: 클러스터 발전이 정부 보조금 중심으로 운영되며 자립적 성장 모델 부재
- 민간 주도의 혁신 부족: 글로벌 혁신 클러스터(예: 실리콘밸리)는 민간 기업이 주도하는 반면, 한국은 정부 주도 정책이 많음
- 생태계 조성 미흡: 창업·벤처 생태계와 연계되지 못해 클러스터 내 기업들이 지속적으로 성장하기 어려움

7.4.2. 사례

- 실리콘밸리 vs 한국 클러스터: 실리콘밸리는 벤처캐피털(VC, Venture Capital)과 스타트업이 주도하는 반면, 한국 클러스터는 정부 지원이 중단되면 기업 성장 동력이 약화됨

7.4.3. 해결 방안

- 민간 투자 활성화를 위한 인센티브 제공(벤처캐피털·기업의 클러스터 참여 확대)
- 자립형 클러스터 모델 구축(R&D→기술사업화→창업→스케일업까지 연결되는 성장 구조)
- 산업 변화에 대응할 수 있는 유연한 클러스터 전략 마련

7.5. 소결

지역혁신클러스터는 대한민국의 미래 성장 동력을 확보하기 위한 필수 전략이지만, 여전히 지역 간 혁신 격차, 산학연 협력 부족, 기술 및 인재 유출, 지속 가능한 성장 모델 부재 등의 문제가 해결되지 않고 있다.

7.5.1. 핵심 해결 방향 정리

- 지방 특화 산업 육성 및 R&D 투자 확대(지역 간 불균형 해소)
- 산학연 협력 플랫폼 구축 및 오픈이노베이션 도입(협력 활성화)
- 우수 인재 유치를 위한 지역 기반 일자리 창출(인재 및 기술 유출 방지)
- 민간 중심의 지속 가능한 클러스터 성장 모델 확립

이러한 문제를 해결하지 않으면 한국의 지역혁신클러스터는 단기적인 성과에 그칠 가능성이 크다. 그러므로 정부와 기업, 연구기관이 장기적인 관점에서 혁신 생태계를 구축해야만 대한민국이 글로벌 혁신 경쟁에서 앞서나갈 수 있을 것이다.

8. 개요

지역혁신클러스터 정책이 성공적으로 자리 잡기 위해서는 기존의 문제점을 해결하고, 장기적인 성장 전략을 마련하는 것이 필수적이다. 이를 위해 지역 맞춤형 혁신 전략 수립, 산학연 협력 강화, 글로벌 연계 강화, 지속 가능한 혁신 생태계 구축 등이 필요하다. 다음은 이러한 방향성을 중심으로 구체적인 정책 제언을 정리한 내용이다.

8.1. 지역 맞춤형 혁신 전략 수립

현재 대한민국의 지역혁신클러스터 정책은 일률적인 지원 방식에서 벗어나, 지역의 산업 및 기술적 특성을 반영한 맞춤형 전략으로 발전해야 한다.

8.1.1. 정책 제언

- 지역별 특화 산업 육성 모델 개발
예) 부산(해양산업), 전북(농생명, 스마트팜), 대구(미래차, 자율주행), 광주(AI, 광산업) 등
- 지역 특화 R&D 지원 확대: 지역별 산업 특성에 맞춘 연구개발(R&D) 자금 지원
- 지역 혁신기관 및 기업 간 협력 체계 구축: 지역 연구소, 대학, 기업이 연계된 클러스터 전략 추진

8.1.2. 기대 효과

- 지역 경제 활성화 및 산업 경쟁력 강화
- 지방 소멸 문제 해결 (지역 내 일자리 창출)

8.2. 산학연 협력 강화 방안

산학연 협력 촉진을 위한 플랫폼 구축: 지역 내 기업, 대학, 연구기관이 효율적으로 협력할 수 있도록 체계적인 협력 플랫폼을 구축해야 한다.

8.2.1. 정책 제언

- 산학연 공동 연구 및 기술 이전 지원 확대: 기업과 대학이 공동으로 연구개발을 수행할 경우, 추가 인센티브 제공
- 기술사업화 지원센터 운영: 연구개발(R&D) 성과를 기업이 활용할 수 있도록 기술 이전 컨설팅 제공
- 산학연 협력 전담 조직 신설: 각 지역별로 산학연 협력 중개 기관 설립(예: '지역혁신센터')
- 클러스터 내 혁신 허브 운영: 기업, 대학, 연구기관이 한 공간에서 협력하는 산학연 융합센터(예: 판교 스타트업 캠퍼스 모델 확대)

8.2.2. 기대 효과

- 연구 성과의 실질적인 사업화 촉진
- 기업과 연구기관 간 협력 활성화

8.3. 글로벌 협력 및 연계 방안

해외 혁신 클러스터와의 연계 강화: 대한민국의 지역혁신클러스터가 국내 시장을 넘어 글로벌 시장과 연결될 수 있도록 지원해야 한다.

8.3.1. 정책 제언

- 글로벌 혁신 클러스터와의 협력 네트워크 구축: 실리콘밸리(미국), 심천(중국), 베를린(독일) 등과 협업 프로그램 운영
- 해외 연구기관 및 대학과의 협력 강화: MIT, 스탠퍼드, 도쿄대 등 글로벌 연구기관과 공동 연구 프로젝트 확대
- 외국인 창업자 및 연구 인력 유치: 해외 우수 인재가 지역 클러스터에 정착할 수 있도록 비자·정착 지원 제도 운용
- 해외 투자 유치 프로그램 활성화: 글로벌 벤처캐피털(VC) 및 다국적 기업과의 협력 강화

8.3.2. 기대 효과

- 지역 기업의 글로벌 시장 진출 기회 확대
- 국제 수준의 연구 협력 활성화

8.4. 지속 가능한 혁신 생태계 구축

정부 주도에서 벗어난 민간 중심의 지속 성장 모델: 현재의 지역혁신클러스터 정책은 정부 지원 중심으로 운영되고 있다. 하지만 장기적으로 자립할 수 있는 혁신 생태계를 구축해야 한다.

8.4.1. 정책 제언

- 민간 투자 확대 유도: 벤처캐피탈(VC), 엔젤투자자 등이 지역 클러스터에 적극 투자할 수 있도록 세제 혜택 제공
- 스타트업 및 중소기업 육성 프로그램 운영: 클러스터 내 창업지원센터운영 및 투자 연계 지원 강화
- 지역혁신 인프라(스마트시티, 테스트베드 등) 구축: 신기술 실증 테스트베드(Testbed) 환경을 조성하여 신산업 개발 촉진
- 규제 개혁 및 행정 절차 간소화: 신기술 도입 및 사업화 과정에서 발생하는 행정적 장벽 제거

8.4.2. 기대 효과

- 클러스터의 자립 성장 유도
- 지속 가능한 혁신 생태계 조성

8.5. 소결

지역혁신클러스터가 국가균형발전과 혁신성장을 견인하기 위해서는 기존 문제점을 해결하고, 장기적인 성장 전략을 마련해야 한다. 이를 위해 지역 맞춤형 혁신 전략, 산학연 협력 강화, 글로벌 연계 강화, 지속 가능한 혁신 생태계 구축 등이 핵심 과제로 떠오른다. <표.5>는 핵심 정책 제언을 요약해 놓은 표이다.

표 5. 지역혁신클러스터를 위한 핵심 정책 제언

	정책 제언	기대 효과
지역 맞춤형 혁신 전략	지역별 특화산업 중심 클러스터 구축	지역별 산업 경쟁력 강화
산학연 협력 강화	공동 연구 및 기술사업화 지원 확대	기업-대학-연구소 협력 활성화
글로벌 협력 및 연계	해외 클러스터와 연계, 해외 투자 유치	글로벌 시장 진출 및 혁신 역량 강화
지속 가능한 생태계 구축	민간 투자 활성화, 창업 지원 확대	장기적인 혁신 생태계 조성

9. 맺음말

본 원고에서는 대한민국 지역혁신클러스터 정책의 개념과 이론적 배경을 검토하고, 현재 추진 중인 정책의 현황과 주요 성과 및 한계를 종합적으로 분석하였다. 지역혁신클러스터는 특정 지역을 중심으로 기업, 대학, 연구기관 등이 협력해 혁신과 성장을 촉진하는 구조를 뜻하며, 이는 산업클러스터 이론이나 혁신 시스템 이론 등의 이론적 기반 위에서 정당화된다. 대한민국은 국가혁신클러스터 사업, 스마트특성화 사업 등을 통해 지역 간 균형 발전을 시도해왔고, 대덕연구개발특구나 판교 테크노밸리 등은 대표적인 성공 사례로 꼽힌다. 그러나 수도권과 비수도권 간의 혁신 격차가 여전히 존재하고, 산학연 협력이 미흡해 기술사업화 성과가 저조하며, 우수한 기술과 인재가 수도권 또는 해외로 유출되는 문제가 지속되고 있다. 또한 정부 주도의 지원 체계는 지속 가능성 측면에서 한계를 드러내고 있어 구조적인 전환이 요구된다.

이러한 도전 과제를 극복하고 지역혁신클러스터를 실질적으로 활성화하기 위해서는 몇 가지 정책적 개선이 필요하다. 우선, 각 지역의 산업 특성을 고려한 맞춤형 클러스터 전략 수립이 필요하며, 이를 통해 지역 주도의 혁신 기반을 마련할 수 있다. 동시에 산학연 협력을 강화하기 위해 공동 연구 프로젝트 확대, 기술이전 지원 등 실질적 연계 방안을 마련하고, 해외 연구기관 및 혁신 클러스터와의 협력을 통해 글로벌 네트워크를 구축해야 한다. 정부의 역할은 초기 지원에 국한하고, 이후 민간의 자율적인 참여를 유도하는 지속 가능한 성장 모델을 도입해야 하며, 이를 위해 벤처 투자 활성화 및 규제 완화가 함께 이뤄져야 한다. 나아가 스마트 시티 조성, 테스트베드 구축, 스타트업 생태계 지원 등을 통해 자생적 클러스터를 육성하는 전략도 병행되어야 한다.

향후에는 이러한 정책적 제언을 구체화하는 데 중점을 둘 필요가 있다. 각 지역의 산업 기반과 경제적 여건을 정밀 분석하여 지역별 맞춤형 클러스터 전략을 수립하고, 독일의 프라운호퍼 연구소나 미국 실리콘밸리 등 해외 선진 사례와의 비교 분석을 통해 실행력을 높여야 한다. 또한 기존 산학연 협력 모델의 한계를 극복할 수 있는 제도적 지원 방안을 도출하고, 기술이전, 창업 지원, 연구 성과의 사업화 등을 촉진할 수 있는 인센티브 체계 구축이 요구된다. 글로벌 연계 강화를 위해 해외 벤처캐피털 및 다국적 기업과의 연계를 통해 국내 기업의 경쟁력을 제고하고, 정부 주도의 일회성 지원을 넘어 민간 중심의 지속 가능한 클러스터 발전 전략을 마련해야 한다. 이러한 정책적 실행과 추가 연구를 통해 대한민국의 지역혁신클러스터가 글로벌 혁신 중심지로 성장할 수 있도록 지속적인 노력이 뒷받침되어야 할 것이다.

저자소개

이규택(Gyu Taek Lee)

- | | |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> · GSB eMBA, Stanford University · 서울대학교 제어계측공학 학사·석사·박사 | <ul style="list-style-type: none"> · (現) 전북테크노파크 원장 · (前) 서울대학교 글로벌 R&DB센터 부센터장 · (前) 산업통상자원R&D전략기획단 신산업MD |
|--|---|

참고문헌

〈국내문헌〉

- 1) 과학기술정책연구원. (2022). "스마트 특성화 전략과 지역산업 육성." 서울: 과학기술정책연구원.
- 2) 국토연구원. (2023). "규제자유특구의 성과 분석 및 개선 방향." 세종: 국토연구원.
- 3) 김영배, 박진수. (2021). "대한민국 지역혁신클러스터의 발전 방향 연구." 한국경제연구원.
- 4) 산업통상자원부. (2023). "국가혁신클러스터 정책 보고서." 서울: 산업통상자원부.
- 5) 중소벤처기업부. (2022). "창조경제혁신센터 운영 성과 및 발전 방안." 서울: 중소벤처기업부.
- 6) 한국연구재단. (2021). "지역 혁신 생태계 구축을 위한 정책적 접근." 대전: 한국연구재단.

〈국외문헌〉

- 1) European Cluster Collaboration Platform (ECCP). (2022). "Fostering Regional Innovation through Clusters." Brussels: ECCP.
- 2) European Commission. (2020). "Smart Specialization Strategy in the European Union." Brussels: European Commission.
- 3) European Commission. (2021). "Horizon Europe: Research and Innovation Programme." Brussels: European Commission.
- 4) Manufacturing USA. (2022). "Advancing Manufacturing Innovation through Regional Networks." Washington, D.C.: U.S. Department of Commerce.
- 5) National Science Foundation (NSF). (2021). "Engineering Research

Centers Program Overview." Arlington, VA: NSF.

- 6) OECD. (2019). "Innovation Clusters in the Digital Era." Paris: OECD Publishing.
- 7) Porter, M. E. (1998). "Clusters and the New Economics of Competition." *Harvard Business Review*, 76(6), 77–90.
- 8) Saxenian, A. (1994). "Regional Advantage: Culture and Competition in Silicon Valley and Route 128." Harvard University Press.
- 9) U.S. Small Business Administration (SBA). (2022). "Regional Innovation Clusters Initiative." Washington, D.C.: SBA.
- 10) U.S. Department of Commerce. (2020). "Economic Development Administration Cluster Programs." Washington, D.C.: EDA.

이 간행물은 2025년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 재원을 받아
작성되었음 (NRF-2023M3C1A6043400)

융합연구리뷰

Convergence Research Review

발행일 2025년 4월 30일

발행인 임혜원

발행처 한국과학기술연구원 미래융합전략센터
(02792) 서울특별시 성북구 화랑로 14길 5
TEL. 02-958-4987 <https://kist.re.kr/fcsc>

편집 공성형, 김우중, 배경은, 박정환



2025

융합연구리뷰

C O N V E R G E N C E
R E S E A R C H
R E V I E W

ADDRESS 02792 서울특별시성북구화랑로14길 5

TEL 02.958.4987



미래융합전략센터
Future Convergence Strategy Center

ISSN. 2465-8456