

논문 분석을 통한 플라즈마 기술 동향 도출

Bibliometric Analysis on Plasma R&D

장한수* · 김유빈** · 최유진*** · 윤정식****

I. 서론

플라즈마는 고체, 기체, 액체와 구분되는 제4의 물질 상태로 기존의 물질에서는 관찰할 수 없는 전기적, 화학적, 자기적 특성을 갖기 때문에 기술적, 산업적으로 다양하게 응용되고 있다. 즉, 반도체 제조공정, 금속 및 세라믹 박막 재료, 물질 합성 등에 응용되는 저온 플라즈마에서 핵융합 반응을 일으키기 위하여 활용되는 초고온 플라즈마까지 활용된다. 이를 위해서는 상압에서부터 고진공 영역에 이르는 범위에서 플라즈마를 발생시킨다.

이처럼 다양한 기술 및 산업적 응용이 이루어지고 있는 플라즈마 분야는 과학기술이 고도화됨에 따라 그 활용 사례가 더욱 확대되며 주목받을 것으로 예측된다(박상례·홍진우·이해준, 2013; 서정현, 2014; 송영훈, 2013; Kushner, 2014; Samukawa et al., 2012.). 그러나 연구개발을 위한 국가 정책 또는 전략 수립의 차원에서 플라즈마 기술 자체에 대한 소위 계량서지(bibliometric) 또는 과학계량(scientometric) 방법론을 적용한 연구는 국내외를 통틀어 거의 전무했던 것으로 파악된다.

이에 본 논문은 플라즈마 관련 연구분야의 동향 분석을 위하여 계량서지 기법을 적용, 주요한 연구주체, 연구 동향과 더불어 전략 기술 분야를 제시하고 향후 동분야의 정책 수립을 위한 기초자료로 활용되도록 하는 것을 목적으로 한다.

이를 위한 문헌 분석은 먼저 플라즈마 기술에 대하여 개략적으로 살펴보고 플라즈마 또는 인접 분야의 계량서지 관련 선행 연구를 검토한다. 또한 계량서지 방법론 차원에서 본 논문에 적용된 전략 다이어그램에 대한 선행 연구도 살펴본다. 실증분석은 WOS의 최근 5년간 논문자료를 활용하여 핵심 연구자와 연구기관, 주요 국가별 연구 경향을 분석하고 전략 다이어그램을 활용하여 전략 기술분야를 제안한다.

II. 플라즈마 기술의 개요

1. 플라즈마의 정의 및 특징

플라즈마는 고체, 액체, 기체와 구분되는 물질의 제4의 상태로서, 하전입자(전자와 이온)들과 중성입자(원자와 분자)들로 구성된 준 중성으로 존재하며 입자간 집단적 상호작용이 일어나는 물질의 상태를 말한다. 즉, 집단적 상호작용 범위 내의 전자와 이온이 동일한 전기량(동일 수)으로 존재하여 전기적으로 중성인 상태로

* 장한수, 국가핵융합연구소 연구정책팀장, 042-879-6111, jjang@nfri.kr

** 김유빈, 국가핵융합연구소 연구정책팀 선임연구원, 042-879-5085, ybkim@nfri.re.kr

*** 최유진, 국가핵융합연구소 연구정책팀 연구원, 042-879-5082, cyj1327@nfri.re.kr

**** 윤정식, 국가핵융합연구소 플라즈마기술연구센터 원천기술연구부장, 042-879-6250, jsyooun@nfri.re.kr

이온과 전자, 해리되지 못한 중성입자들의 혼합된 형태로 존재하는 물질의 상태를 플라즈마 상태라고 부른다. 실생활에 영향을 미치는 플라즈마는 일상생활에서 항상 관찰할 수 있으며, 형광등, 번개, 태양, 그리고 극지방의 오로라가 그 예이다.

플라즈마는 전자와 분자 혹은 원자의 충돌에 의한 이온화 과정을 통해 생성되며, 높은 운동에너지를 가지는 특징이 있다. 즉, 물질이 고체 상태에서 기체 상태가 될수록 분자 혹은 원자들의 운동에너지는 증가하고 결합으로부터 떨어져 나오려는 속성을 가진다. 구체적으로는 기체 상태는 액체상태보다 높은 운동에너지를 갖는 분자 혹은 원자들이 결합상태에서 완전히 해방되어 자유롭게 움직이는 상태이다. 여기에 외부에서 더 많은 에너지를 공급하여 기체 분자들이 더 많은 운동에너지를 갖게 되는 경우 원자나 분자들은 원자핵과 그 주위의 전자들의 전하량이 정확히 같은 전기적 중성을 유지하며, 입자들의 충돌 시 전하의 해리현상이 일어난다. 즉, 플라즈마는 이온화 과정을 거쳐 전자와 이온, 중성입자가 혼합된 기체 상태로 존재하게 되고, 이 상태를 플라즈마 상태라고 부른다.

플라즈마는 전기적, 화학적, 물리적, 자기적 특성을 가진다. 플라즈마는 전체적으로는 중성이지만, 1만 개에서 백만 개 정도의 이온과 자유 전자가 존재하기 때문에 외부의 전기장에 의해 전류를 흘릴 수 있는 전기적 특성을 갖는다. 특히 플라즈마의 온도는 입자의 운동 상태와 직접적으로 연관되기 때문에 전도도 증가와도 관련된다.

플라즈마 내부에서 활발하게 운동하는 전자와 이온은 다른 물질을 여기 및 전리시킬 수 있어 화학반응을 활발하게 일어나도록 하는 화학적 특성이 있다.

또한 플라즈마는 자기적 특성을 가지고 있어 내부에 있는 전자와 이온들에 자기장을 걸어주면 운동방향이 자기장의 방향과 직각으로 원 운동을 하게 되며 이러한 방식으로 플라즈마의 밀도를 원하는 곳에 집중시킬 수 있다. 이러한 자기적 특성을 이용하면 전압을 상승시키지 않고 높은 밀도의 플라즈마를 생성시킬 수 있다.

플라즈마는 하전입자와 중성입자의 혼합된 상태로, 구성입자들의 운동에너지가 고체, 액체, 기체 상태보다 높다. 특히, 하전입자의 존재는 전기장을 이용하여 쉽게 하전입자를 가속할 수 있는 특성을 가지며, 이는 플라즈마를 산업에 응용하는데 가장 큰 장점이 된다.

2. 플라즈마의 분류 및 응용분야

플라즈마 발생 방식에 따라 상압 플라즈마와 저압 플라즈마로 나눌 수 있다. 상압 플라즈마는 공정 압력이 수백 Torr에서 대기압(760Torr)인 상태에서 형성되므로 고가의 진공부품은 필요치 않으며 구조가 간단하고 저렴한 것이 특징이다.

<표 1> 플라즈마 발생 방식에 따른 분류

발생방식	내용
상압	수백Torr~대기압(750 Torr)인 상태에서 발생하는 플라즈마 형태
저압	진공펌프를 이용해 10 ⁻⁵ ~10 ⁻⁷ Torr 이하의 초기진공도(Base pressure)의 환경을 만든 후, 원하는 공정 가스를 이용해 수 mTorr~수 Torr의 공정압력에서 발생시키는 형태

저압 플라즈마는 고가의 고성능 진공펌프를 이용해 10⁻⁵에서 10⁻⁷Torr 이하의 초기 진공(Base Pressure) 환경을 만든 후, 원하는 공정 가스를 이용해 수 밀리 Torr에서 수 Torr의 공정 압력에서 플라즈마를 발생시킨다 (<표 1> 참조).

플라즈마는 전자의 온도와 밀도에 의해 초고온 플라즈마, 고온 플라즈마, 저온 플라즈마로 분류할 수도 있다. 저온 플라즈마는 반도체 제조 공정에서 가장 널리 사용되고 있으며, 고온 플라즈마는 금속의 절단, 재료 및 물질 합성 등의 분야에서 응용된다. 초고온 플라즈마는 핵융합 등에서 활용된다(<표 2> 참조).

<표 2> 플라즈마 응용기술 분류

구분	특징	활용분야
초고온	- 구성입자는 국부열평형 상태 - 온도는 1억℃, 밀도는 100조/cm ³ - 핵융합 반응을 위해 꼭 필요	KSTAR나 ITER와 같은 핵융합 발전의 기초연구와 기술개발
고온	- 0.1기압(104 Pa) 이상의 고압에서 국부 열평형 상태 - 전자의 밀도가 10 ¹⁶ cm ⁻³ 이상을 유지 - 저전압, 고압에서 생성	폐기물의 열분해 및 소각용융, 스프레이 코팅과 나노입자 합성 등의 환경 및 소재 산업에 사용
저온	- 플라즈마의 이온화 정도가 낮고 비평형 상태 - 온도가 1만~10만℃ - 기체 온도는 상온으로 낮은 상태 유지	반도체, 표면처리, 디스플레이 등 산업적으로 가장 활발히 응용

<표 3> 플라즈마 응용 분야

종류	응용분야	내용
저온	Dry etching	플라즈마에 의해 활성화된 라디칼, 전자 등을 이용한 etching
	CVD	플라즈마 이용 기상합성으로 기능성 막을 생성시키는 방법(주로 반도체 분야의 thin film 형성에 적용)
	플라즈마 중합	플라즈마에 모노머를 주입시켜 polymerization을 통하여 기관에 고분자막 생성
	표면개질	플라즈마에 의해 활성화된 이온이나 전자들에 의해 고체표면을 화학적으로 개질
	Sputtering	ion 등을 전계로 가속시켜 대상물질에 입사, 대상물에서 이온 등의 입자가 방출되고 이를 기관에 증착 또는 코팅
고온	플라즈마 용접·절단	플라즈마의 고온을 이용한 재료의 가공
	플라즈마 용사	고온점 분말을 플라즈마로 녹여 고체 표면위에 coating시켜 내열, 내식, 내마모성 등을 높임
	초미립자 제조	열 플라즈마의 고온, 고활성을 이용하여 기상반응 등으로 합성된 입자를 급냉시켜 초미립자로 합성
	화학적 물리적 증착	플라즈마를 이용한 기능성 막을 생성
	환경기술	열 플라즈마의 고온, 고활성을 이용하여 폐기물 분해 및 유리화
	플라즈마 소결	난소결성의 세라믹 등을 단시간에 치밀화
	플라즈마 야금	플라즈마의 고온, 활성을 이용하여 금속을 정련, 제련

플라즈마 응용분야에 따라 고온플라즈마와 저온플라즈마 이용군으로 분류할 수 있다. 대표적 사례는 플라즈마 식각(Plasma Etching) 및 증착(PECVD: Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition) 공정, 금속이나 고분자의 표면개질, 신물질 합성, 공정 미세화, 저온화 필요성으로 플라즈마 공정의 종래 공정 대체, 플라즈마만이 제공할 수 있는 물질이나 환경을 이용하기 위한 응용분야 등 그 응용 사례가 점점 더 확대되고 있다(<표 3> 참조).

III. 선행연구

플라즈마에 대한 계량서지 차원의 접근은 국내외적으로 거의 전무한 것으로 파악된다. 다만, 국내 연구자의 플라즈마 기술에 대한 소개 및 다양한 분야의 적용에 관한 동향 파악 수준의 연구는 존재하였다(박상례 등, 2013; 서정현, 2014; 송영훈, 2013; 심은용 등, 2013; 이창호·조무현, 2013; 이호준·차주홍, 2014; 장영훈 등 2013). 이러한 연구는 바이오, 기계, 전력전자, 디스플레이 등 다양한 분야에 걸쳐 있음을 간접적으로 확인할 수 있다.

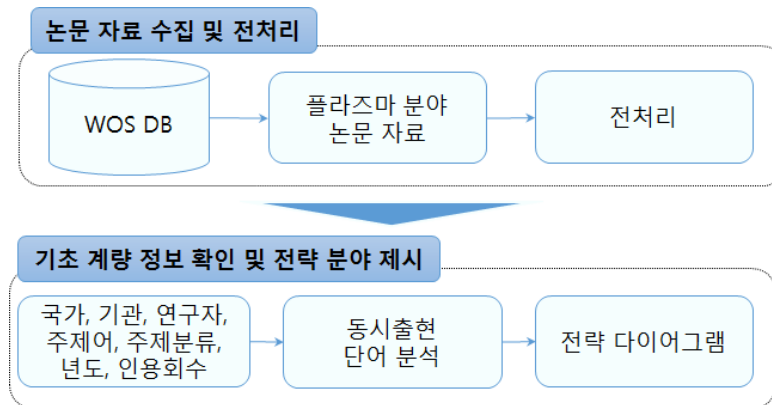
한편, 과학기술 분야별 계량서지 접근을 통한 동향 파악이나 전략 수립을 위한 기초 자료로 활용하기 위한 연구는 다수 존재한다. 강종석 등(2010)은 폭넓은 에너지 분야의 다학제적 경향을 파악, 안세정 등(2012)은 LED, OLED, LCD, PDP, CRT로 정의한 디스플레이 영역에 대한 연구 경향 분석, 채재우 등(2005)은 금속재료 분야의 혁신 원천에 대한 파악 등을 목적으로 계량서지 방법론을 적용하였다.

특히, 이우형 등(2011), 이재운 등(2011)은 LED 분야에 대한 계량서지 접근을 통하여 기초적 동향 파악과 더불어 국가 또는 핵심 주제를 밝히기 위한 방법론으로 전략 다이어그램을 적용하였다. 이러한 연구는 Callon et al.(1991)의

IV. 분석 방법 및 대상 자료

1. 분석 방법

분석 자료 수집 및 결과를 도출하는 과정은 (그림 1)과 같다.



(그림 1) 분석 과정의 개략도

먼저 WOS(Web of Science) DB에서 검색을 통하여 논문 자료를 수집한다. 수집된 논문 자료는 전처리 과정을 거쳐 분석이 가능한 수준으로 정제한다. 정제 과정은 Vantage Point를 활용한다.

정제된 논문 자료를 바탕으로 기초 계량정보인 국가, 연구기관, 연구자, 주제어, 주제 분류, 발행년도, 인용 회수 등을 활용하여 해당분야의 기본적 추세를 파악한다. 기초 계량정보는 다시 동시출현 단어분석으로 산출된 수치자료를 이용하여 전략 다이어그램을 도출한다.

2. 대상 자료 수집 및 정제

분석 대상이 되는 플라즈마 분야의 자료는 2009년부터 2013년에 발행된 논문 19,500건을 WOS(Web of Science) DB에서 2014년 10월 기준으로 수집하였다. 검색어는 논문 제목에 ‘plasma’를 포함한 ‘Article’과 ‘Proceedings paper’만을 대상으로 하였다. 플라즈마는 물리학 분야뿐만 아니라, 의학 분야에서 ‘혈장’이라는 의미로 활용되는 범용적인 용어이기 때문에 검색식에 해당 분야를 제외하도록 설정하였다. 자료 수집 후 전처리 과정에서 국가명, 기관명, 주제어를 정제하였다. 주제어 정제 과정에서 전문가의 검토의견에 따라 해당분야의 통상적 주제어는 제외하였다.

V. 분석 결과

1. 기초 계량정보 분석

본문

2. 동시 출연 단어 분석

본문

3. 전략 연구 분야

본문

VI. 결론

본문

참고문헌

- 강종석, 정현상, 이일형 (2010), "과학기술논문을 통한 에너지 연구 분야의 다학제 동태 추적분석", 「기술혁신학회지」, 13(4): 680-699
- 박상례, 홍진우, 이해준 (2013), “플라즈마 메디신: 저온 상압 플라즈마는 어떻게 의학분야에 적용될 수 있는가?”, 「생명과학회지」, 23(6): 838-846
- 서정현 (2014), “플라즈마의 바이오 분야 응용에 관한 연구 동향”, 「인포메이션 디스플레이」, 15:(3): 18-25
- 송영훈 (2013), “플라즈마를 활용한 기계기술”, 「기계저널」, 53:(4): 33-37
- 심은용, 안일근, 이승교 (2013), “핵융합 플라즈마와 전력전자 기술”, 「전력전자학회지」, 18:(3): 34-39
- 안세정, 심위, 이준영 (2012), "과학계량학 기법을 이용한 디스플레이 연구영역의 트렌드 탐지", 「한국전자통신학회지」, 15(4): 1-10

- 신학회 논문지], 7(6): 1343-1351
- 이우형, 여운동, 박준철 (2011), "계량서지분석을 통한 국가간 협력도 분석에 관한 연구 : LED분야를 중심으로", 「정보시스템연구」, 20(3): 111-127
- 이재윤, 김판준, 강대신, 김희정, 유소영, 이우형 (2011), "계량서지적 기법을 활용한 LED 핵심 주제영역의 연구 동향 분석" 「정보관리연구」, 42(3): 1-26
- 이창호, 조무현 (2013), "플라즈마의 이해", 「전력전자학회지」, 18(3): 29-33
- 이호준, 차주홍 (2014), "상압 플라즈마의 생성과 응용", 「인포메이션 디스플레이」, 15(3): 12-17
- 장영훈, 이제환, 노태우 (2013), "열 플라즈마 응용을 위한 전력전자 기술", 「전력전자학회지」, 18(3): 40-43
- 채재우, 조규갑, 김정흠, 이용태 (2005), "논문정보를 활용한 첨단 금속재료기술 혁신원천의 동태적 특성 분석", 「기술혁신학회지」, 8(3): 1027-1059
- Callon, M., Courtial, J. P. and Laville, F. (1991), "Co-Word Analysis as a Tool for Describing the Network of Interactions between Basic and Technological Research: The Case of Polymer Chemistry," *Scientometrics*, 22(1): 153-205.
- Kushner, Mark (2014), "A Low Temperature Plasma Science Program: Discovery Science for Societal Benefit", A White Paper to the 2014 FESAC Strategic Planning Panel
- LEE, BANGRAE and JEONG, YONG-IL (2008), "Mapping Korea's national R&D domain of robot technology by using the co-word analysis", *Scientometrics*, 77(1): 3-19
- Samukawa, Seiji, et al. (2012), "The 2012 Plasma Roadmap", *JOURNAL OF PHYSICS D: APPLIED PHYSICS*, 45(25)