

## 고온 플라즈마 진단 기술

남 용 운

핵융합 발전을 일으키는 방법은 어찌 보면 간단하다. 핵융합을 통해 에너지를 생산할 수 있는 수소나 중수소와 같은 물질들을 모아 놓고 이 물질들이 핵융합 반응을 일으킬 수 있는 온도 이상으로 가열하기만 하면 된다. 만일 이러한 물질들을 담을 수 있는 그릇이 있다면 핵융합은 벌써 이루어졌을 것이다. 문제는 핵융합 반응을 일으키기 위해서는 수억 도 이상으로 수소나 중수소를 가열해 주어야 하며 그렇게 뜨거운 물질을 직접 담을 수 있는 그릇은 지구상에 존재하지 않는다는 점이다.

물질을 수억 도까지 가열하게 되면 분자 상태의 기체에서 전자가 하나 들썩 떨어져 나가 음전하를 띠는 전자와 양전하를 띠는 이온으로 분리되며 이러한 상태를 플라즈마라고 한다. 이처럼 플라즈마가 전하를 띠는 입자들로 이루어졌다는 점에서 착안하여 강력한 자기장을 가하여 하전입자들이 그 주위를 맴돌게 함으로써 플라즈마를 공중에 띄워 놓고 가열을 하는 것이 바로 토카막으로 대표되는 자기 구속 핵융합 방식이다. 2007년 국가핵융합연구소에 건설된 KSTAR(Korea Superconducting Tokamak Advanced Research)<sup>[1]</sup> 역시 이러한 자기 구속 핵융합 방식의 연구 장치이다.(그림 1) 하지만 이 플라즈마는 자기장으로 구속을 한다고 해도 그냥 제자리에 있는 것이 아니라 끊임없이 바깥으로 튀어나가려고 한다. 따라서 이러한 플라즈마를 지속적으로 관찰하며 도망가려고 하면 제자리를 잡아 주는 동시에 플라즈마의 성질을 연구하여 잘 도망가지 않는 상태로 유지시켜 주어야 하는데 이때 필요한 것이 바로 플라즈마 진단 기술이다.

그런데 플라즈마에 있어서는 유독 측정(measurement)이라는 일반적인 용어 대신에 진단(diagnostic)이라는 의학적인 용어를 사용한다는 점이 의미심장하다. 이는 플라즈마가 온도나 밀도 같은 몇 개의 수치로 설명될 수 있는 단순한 물질이 아니라 다양한 방법을 통해서 다각도로 분석이 되어야 그 실

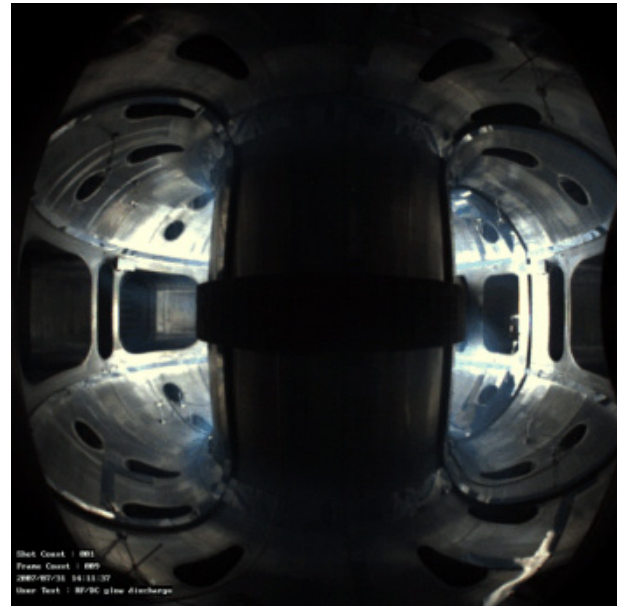


그림 1. DC 글로우 방전 테스트 중인 KSTAR의 내부.

체를 드러내는 복잡한 물질이라는 사실을 나타낸다.

그렇다면 플라즈마는 왜 그렇게 복잡할까. 헬륨을 예로 들면 기체 상태일 때는 종류가 한 가지이지만 플라즈마 상태가 되면 전자가 떨어져 나와 전자와 이온으로 분리된다. 물론 충분한 에너지를 얻지 못한 헬륨은 중성인 상태 그대로 남아 있으므로 총 세 가지의 입자가 공존한다. 게다가 온도가 점점 더 올라가면 전자들이 추가로 떨어져 나와 2가 이온과 3가 이온, 그리고 전자들이 모두 떨어져 나간 헬륨 원자핵들도 생겨난다. 따라서 단순한 기체 상태일 때보다 구성 입자들의 종류가 훨씬 많아진다. 하지만 플라즈마가 분석하기 어려운 이유는 단순히 입자들의 종류가 많기 때문은 아니다. 문제는 이러한 입자들의 대부분이 전하를 띠고 있다는 점이다. 플라즈마를 구성하고 있는 입자들은 전자기력에 의해 서로 끌어당기거나 밀어내기도 하고 외부의 전자기장에 반응하여 움직이는 한편 스스로의 움직임으로 또 다른 전자기장을 유도하기

### 저자약력

남용운 박사는 서울대학교 원자핵공학과에서 간섭계를 이용한 박막 두께 및 플라즈마 밀도 측정에 대한 연구로 박사(2000-2005) 학위를 취득하였다. 박사 과정 중 KSTAR의 밀리미터파 간섭계 진단 연구에 참여하였으며 졸업 후 현재까지 국가핵융합연구소에서 간섭계를 이용한 플라즈마 진단 연구를 수행하고 있다. (yunam@nfri.re.kr)

### 참고문헌

[1] J. S. Bak *et al.*, *Cryogenics* **47**, 356 (2007).

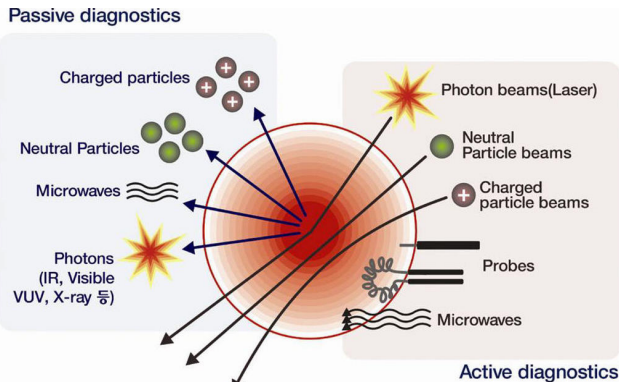


그림 2. 플라즈마의 다양한 진단 원리.

도 한다. 비록 자기장에 의해 구속이 되어 있기는 하지만 마치 그물에 걸린 물고기처럼 끊임없이 움직이며 그 움직임을 예측하기 힘든 유기체와 같은 특징 때문에 플라즈마는 측정이라는 단어보다는 진단이라는 단어가 더 어울린다.

### 플라즈마의 다양한 진단 방법

자기장에 의해 공중에 떠 있는 플라즈마를 진단하는 것은 쉬운 일이 아니다. 일단 플라즈마 자체의 온도가 매우 높기 때문에 내부에 진단장치를 넣는 것은 불가능하다. 기껏해야 온도가 낮은 경계 부분에 작은 탐침을 삽입해 보는 것 정도다. 우리가 볼 수 있는 것은 블랙박스과 같은 플라즈마의 겉모습뿐이다. 이러한 제한된 정보로부터 플라즈마의 내부 구조를 속속들이 알아내고자 하는 것이 플라즈마 진단을 연구하는 사람들의 목표다.(그림 2)

우선 플라즈마에서 얻을 수 있는 가장 큰 정보는 자체적으로 방출하는 다양한 파장의 전자기파다. 플라즈마 내부에서는 입자들이 끊임없이 움직이고 서로 반응하면서 에너지를 얻거나 잃으며 이 과정에서 전자기파를 주고받는다. 이러한 전자기파 중 일부가 바깥쪽으로 방출되며 이렇게 방출된 전자기파는 플라즈마의 내부 상태를 알 수 있는 중요한 정보가 된다. 또한 이러한 플라즈마의 움직임에 의해 주변의 전자기장이 변화하게 되는데 이 또한 플라즈마의 상태를 유추할 수 있는 정보다.

이처럼 플라즈마가 자발적으로 내 놓는 정보를 수집하는 방법도 있지만 적극적으로 플라즈마를 시험해 보기도 한다. 가장 일반적인 것은 플라즈마 내에 전자기파를 입사시키는 방법이다. 플라즈마로 들어간 전자기파는 변형되거나 혹은 반사되어 플라즈마를 빠져나오며 때로는 플라즈마 내에 흡수되어 버리기도 한다. 이렇게 빠져나온 전자기파를 분석하면 플라즈마의 물성에 대한 정보를 얻을 수 있다. 좀 더 적극적인 방법으로는 플라즈마의 경계 부분에 탐침을 삽입하거나 외부에서 추적할 수 있는 성분을 플라즈마 내에 투입하여 반

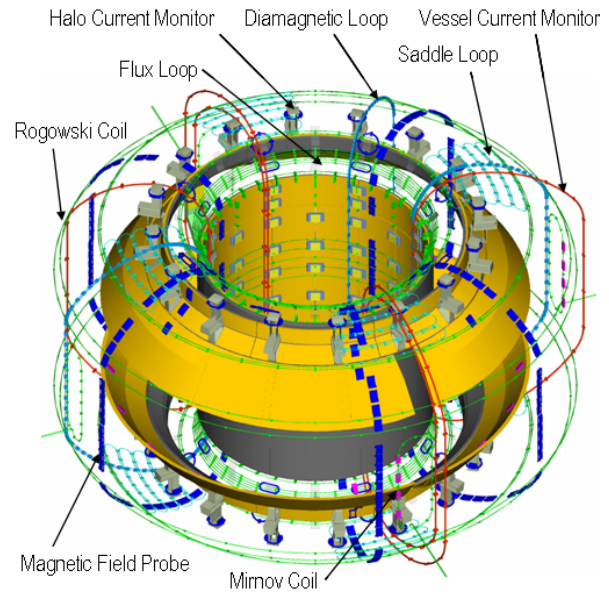


그림 3. KSTAR 자기장 진단계의 종류 및 배치.

응을 살펴보는 방법도 있다.

우선 플라즈마로 인해 변화하는 바깥쪽의 자기장을 측정하는 진단법에 대해 알아보자. 자기장의 측정은 코일을 통해 이루어진다. 도선이 휘감은 단면적 내의 자기장의 세기가 변화하면 도선에 전류가 유도되는 현상을 이용하는 것이다. 코일에 흐르는 전류의 양은 코일이 감싸고 있는 단면적과 코일의 턴 수에 비례하므로 넓은 면적을 측정할 때는 한 바퀴를 감싸는 루프를 사용하며 국부적인 자기장을 측정할 때는 작은 크기로 여러 턴이 감긴 코일을 이용한다. 자기장은 플라즈마를 구속하는 역할을 하므로 자기장의 분포를 측정하면 이로 인해 결정되는 플라즈마의 형태를 계산할 수 있다. 또한 플라즈마가 움직일 때 이로 인해 발생하는 유도 자기장을 측정하면 플라즈마의 움직임을 측정할 수도 있다. 토카막에는 자기장을 측정하기 위한 다양한 코일과 루프들이 곳곳에 배치되어 있다.(그림 3) 이러한 루프 및 코일은 플라즈마 내부에 넣을 수는 없으므로 벽면에 많은 수의 코일을 배치한 뒤 여기서 측정되는 신호를 조합하여 전체적인 플라즈마의 위치나 형태, 혹은 떨림을 역산해 내게 된다.

플라즈마에서 방출되는 다양한 파장의 전자기파를 측정하는 분광 진단법은 가장 널리 사용되는 플라즈마 진단법이다. 플라즈마에서 복사(radiation)되는 파장은 발생 원인에 따라 0.01 nm( $10^{-11}$  m) 이하의 감마선에서부터 수십 cm의 극초단파까지 다양하다.(그림 4) 이러한 전자기파 중 가장 대표적인 것이 바로 빛, 즉 가시광선이다. 널리 이용되고 있는 플라즈마 표시 장치(PDP: Plasma Display Panel)는 플라즈마의 성분에 따라 복사되는 가시광선의 파장이 달라지는 현상을 이용한 것이다. 플라즈마에서는 이처럼 눈으로 볼 수 있는 가

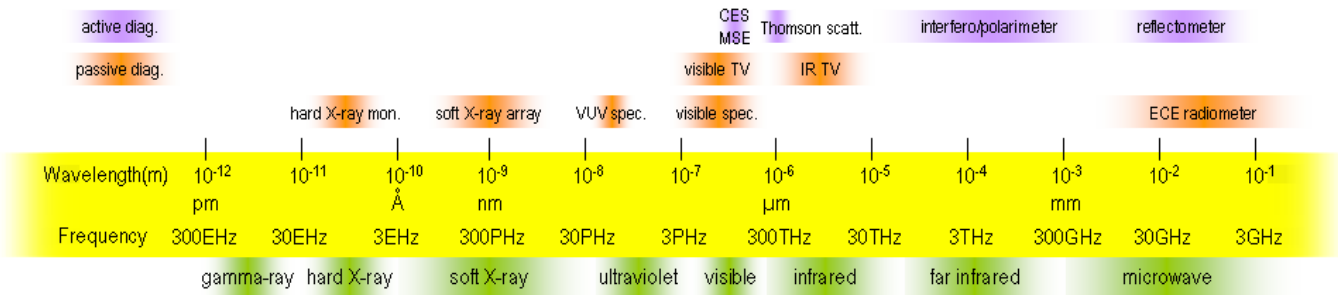


그림 4. 전자기파의 파장에 따른 다양한 플라즈마 진단법.

시광선 외에도 엑스선, 자외선, 적외선, 극초단파 등이 항상 방출되고 있다. 플라즈마 입자들은 끊임없이 움직이며 서로 충돌하거나 반응을 일으키는데 이 과정에서 에너지를 잃으면 그에 해당하는 파장의 전자기파가 발생된다. 잃은 에너지의 크기가 크면 클수록 발생하는 전자기파의 파장이 짧아지므로 외부로 방출되는 전자기파의 파장과 크기를 분석하면 플라즈마 내에서 어떤 현상이 일어나고 있는지, 또한 그 현상이 얼마나 많이 일어나고 있는지를 알아낼 수 있다. 플라즈마 내에서 입자가 에너지를 잃는 과정은 크게 두 가지로 구분할 수 있는데 하나는 자유 전자가 자기장 또는 주위 입자들의 전자 기력에 의해 경로 변화를 겪으면서 전자기파를 방출하는 과정이다. 이런 방식으로 잃은 에너지는 그 크기가 정해져 있지 않으므로 상황에 따라 전 파장에 걸쳐 전자기파가 방출된다. 다른 하나는 원자핵에 구속된 전자의 에너지준위가 전이하면서 발생한 에너지 손실에 해당하는 전자기파가 방출되는 경우인데 이 경우는 에너지준위의 차이가 항상 일정하므로 언제나 특정한 파장의 전자기파가 방출된다는 특징이 있다.

자유 전자에 의해 방출되는 전자기파 중 가장 대표적인 것이 자기장 주위를 회전하는 전자에 의해 방출되는 사이클로트론 복사이다. 이러한 사이클로트론 복사의 파장은 자기장의 세기에 의해 결정되는데 토카막처럼 수 Tesla의 자장이 걸리는 상황에서는 수 ~ 수십 cm의 파장에 해당하는 전자기파가 발생된다. 이러한 전자기파의 세기는 회전하는 전자의 온도에 비례하는 경향이 있으므로 방출되는 전자기파의 세기를 측정하면 플라즈마의 온도에 대한 정보를 얻을 수 있다. 이와 같은 진단장치를 전자 사이클로트론 방출(ECE: Electron Cyclotron Emission) 복사계(radiometer)라고 한다.

자유 전자에 의해 전자기파가 방출되는 또 한 가지 경우는 전자가 주변의 하전입자와 충돌하면서 발생하는 제동복사(bremsstrahlung radiation)이다. 제동복사는 X-ray에서 극초단파까지 폭 넓은 파장을 방출한다. 자유 전자가 충돌을 통해 자신의 에너지를 잃는 경우에는 원래 가지고 있던 에너지보다 더 큰 에너지를 잃을 수 없으므로 방출되는 전자기파는 주로 극초단파에서 무른 엑스선(soft X-ray)까지이다. 하지만

자유 전자가 불안정한 하전입자와 충돌하며 결합하여 안정한 상태가 되는 재결합(recombination) 반응의 경우에는 원래 가지고 있던 에너지보다 더 큰 에너지를 방출하게 되는데 이 경우에는 대부분 자외선에서 무른 엑스선(soft X-ray)까지의 전자기파가 방출된다. 또한 에너지가 매우 높은 전자의 경우에는 벽과 충돌하며 큰 에너지를 잃어 굳은 엑스선(hard X-ray)을 방출하기도 하는데 이 또한 플라즈마의 상태를 알 수 있는 중요한 지표 중 하나이다. 엑스선 영역에서는 전자의 온도가 낮을수록 그만큼 방출할 수 있는 에너지가 적으므로 파장이 짧아짐에 따라 제동복사의 강도가 급격하게 감소하게 되는데 이를 분석하여 전자의 온도를 계산할 수 있다. 가시광선 영역에서는 재결합 반응에서 발생한 전자기파는 거의 존재하지 않으며 전체적인 복사의 강도가 전자가 충돌하는 입자들의 평균적인 특성, 특히 전하량에 비례하게 되므로 유효 이온 전하량( $Z_{eff}$ )을 측정하는데 이용한다.

이처럼 자유 전자에 의한 복사가 다양한 파장의 전자기파를 방출하는데 반해서 구속 전자의 에너지준위 전이에 의해 발생하는 복사는 전이되는 에너지의 차에 해당하는 정해진 파장의 전자기파만을 방출한다. 한 파장에서만 집중적으로 복사가 이루어지므로 선복사(line radiation)라고도 하는 이러한 전자기파는 플라즈마 내에 있는 특정한 물질 또는 반응의 지문과 같은 역할을 하므로 해당되는 파장의 방출 강도가 높을수록 밀도가 높거나 반응이 많이 일어나는 것이라고 해석할 수 있다. 이런 진단법은 플라즈마 내에 포함된 불순물의 종류 및 밀도를 측정하거나 플라즈마 상황의 지표가 되는 특정한 반응을 감지하는데 주로 사용된다. 물론 실제로 방출되는 전자기파의 파장은 다양한 요인에 의해 이론적인 수치보다 약간 달라지는데 이를 역으로 이용하면 플라즈마의 중요한 정보를 얻을 수 있다. 전자기파를 방출하는 파원이 검출기에 가까워지면 측정되는 파장이 짧아지고 멀어지면 파장이 길어지는 도플러 효과가 대표적인데 입자의 온도가 높으면 높을수록 속도가 빨라져서 도플러 효과가 강해지고 이에 따라 실제 측정되는 스펙트럼이 더 넓은 파장대역으로 퍼지게 된다. 따라서 이 퍼지는 정도를 측정하면 입자의 온도를 계산할 수 있다.(그림 5) 또한

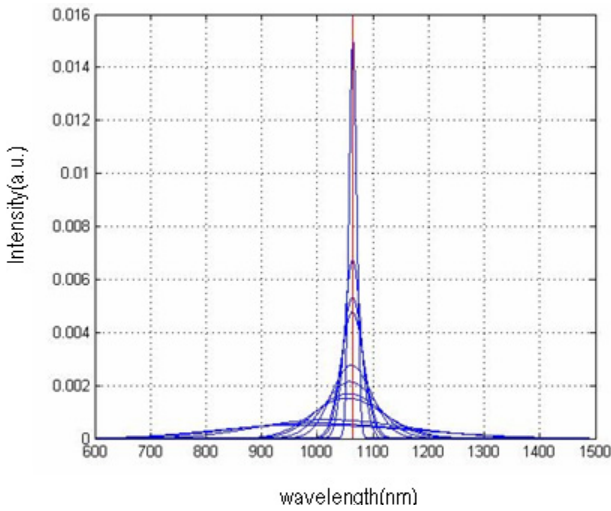


그림 5. 톰슨 산란에 의해 측정되는 스펙트럼의 형태. 봉우리의 높이가 높을수록 전자 밀도가 높고 폭이 넓을수록 전자 온도가 높은 것을 나타낸다.

방출되는 파장은 전기장(Stark effect)이나 자기장(Zeeman effect)에 의해 변화하기도 하는데 이 또한 잘 이용하면 플라즈마 내의 중요한 정보를 알아내는 수단이 될 수 있다.

분광 진단법은 이처럼 많은 정보를 플라즈마로부터 알아낼 수 있지만 반대로 말하면 많은 정보들이 모두 뒤섞여서 한꺼번에 방출된다는 뜻이기도 하다. 만일 두 가지 현상에 의해 같은 파장의 전자기파가 방출된다면 외부에서 그 두 가지 현상을 구분해 낼 방법은 없다. 따라서 특정한 정보만을 반영하는 파장 대역을 찾아내는 것이 분광 진단법에서는 가장 중요한 기술 중 하나이다. 또 한 가지 문제점은 플라즈마의 모든 지점에서 발생하는 전자기파가 뒤섞여서 방출되기 때문에 전자기파를 방출한 물질이나 반응이 어느 지점에 있는지 알기 힘들다는 점이다. 이를 해결하는 가장 일반적인 방법은 렌즈를 이용한 이미징(imaging) 시스템을 구축하는 것인데 이렇게 하면 특정 지점에서 방출된 전자기파가 집중적으로 검출기에 도달하게 되므로 조밀하게 배열된 검출기 묶음을 이용하면 플라즈마 물성의 1차원 또는 2차원 분포를 측정할 수 있다. 각 진단의 특성을 사용하여 이 문제를 해결하기도 한다. 대표적인 것이 ECE 복사계인데 토카막에서는 반경 방향의 위치에 따라 자기장의 세기가 다르고 이로 인해 방출되는 사이클로트론 복사의 주파수가 달라진다는 점을 이용하여 방출 위치를 역산할 수 있다. 또한 반응이 일어나는 위치를 한정시키는 방법이 있는데 대표적인 것이 톰슨 산란(Thomson scattering) 진단법으로 강한 펄스 레이저를 플라즈마 내에 입사시켜 이로 인해 여기된 전자가 안정 상태로 돌아가며 방출하는 전자기파를 측정하는 방법이다. 이렇게 하면 레이저가 지나간 곳에서만 전자기파가 방출되므로 반응이 일어난 위치

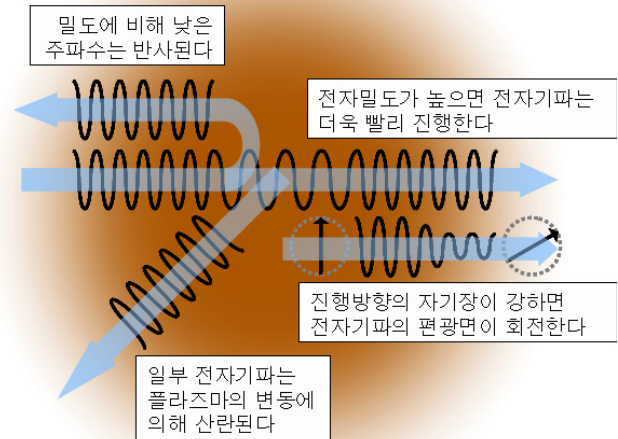


그림 6. 플라즈마에 입사된 전자기파의 다양한 반응.

를 보다 정확하게 알 수 있다. 이러한 톰슨 산란 진단법은 전자의 온도와 밀도에 대한 분포를 잴 수 있기 때문에 토카막에서 중요한 진단으로 자리매김하고 있다. 또한 플라즈마를 가열하기 위한 중성입자빔(neutral beam)으로 인해 일어나는 반응에서 방출되는 전자기파를 측정하는 방법도 있는데, 전하 교환 분광법(CES: Charge Exchange Spectroscopy), 빔 방출 분광법(BES: Beam Emission Spectroscopy), 이동 스타크 효과 분광법(MSE: Motinal Stark-Effect) 등이 그러한 진단법에 속하며 각각 이온 온도, 밀도 요동(fluctuation), 자기장 각도의 분포를 측정할 수 있어 주목받고 있는 진단들이다. 또한 가시광선이나 적외선 영역의 영상을 측정하는 카메라 시스템이나 전체적인 복사 에너지를 측정하는 볼로메터(bolometer) 진단계 역시 분광 진단법에는 속하지 않지만 플라즈마에서 방출되는 복사를 이용하는 가장 기본적인 플라즈마 진단 장비들이다.

이처럼 플라즈마에서 자체적으로 방출되는 전자기파를 측정하는 것과는 달리 직접 특정한 전자기파를 플라즈마 내에 입사시키고 빠져나온 전자기파로부터 플라즈마에 대한 정보를 얻어내는 진단법이 있다. 이 방법은 다른 말로 굴절률(refractive index) 측정법이라고도 하는데 굴절률이란 전자기파의 위상이 매질 내에서 전파되는 속도를 나타내는 지표다. 이를 굴절률이라고 하는 이유는 빛이 공기와 물, 공기와 유리처럼 서로 다른 매질을 지날 때 경계에서 굴절되는 각도가 이 수치의 비에 의해 결정되기 때문이다. 플라즈마 내에서의 굴절률은 주로 전자의 밀도와 자기장의 방향, 전자기파의 입사 방향 그리고 전자기파의 주파수에 의해 결정되는데 적당

한 주파수를 갖는 전자기파를 방향을 잘 맞춰 입사시키면 통과하고 나온 전자기파를 분석함으로써 플라즈마 내의 전자 밀도에 대한 정보를 얻을 수 있다.(그림 6)

가장 일반적으로 사용되는 방법은 충분히 높은 주파수의 전자기파가 플라즈마를 지난 뒤 변하는 위상을 측정하는 방법이다. 전자의 밀도가 높을수록 전자기파의 속도 - 여기서 말하는 속도란 위상이 전파되는 속도(phase velocity)로 실제 빛이 이동하는 속도(group velocity)와는 다르다 - 가 빨라지므로 최종적으로 플라즈마를 지나온 전자기파의 위상이 그만큼 변화하게 된다. 이 위상의 차이는 그대로는 측정하기 어렵지만 위상이 고정된 다른 전자기파와 간섭을 시키면 두 위상이 같을 때는 보강 간섭이 일어나 전자기파의 강도가 세지며 다를 때는 상쇄 간섭이 일어나 강도가 약해진다. 이렇게 위상의 차이를 측정하여 이를 플라즈마의 전자 밀도로 환산하는 방법을 간섭 진단법(interferometry)이라고 한다. 좀 더 복잡한 방법으로는 전자기파를 자기장의 방향과 평행하게 입사시키는 방법이 있다. 이렇게 하면 전자가 자기장을 중심으로 회전하고 있으므로 그 방향에 맞는 전자기파의 성분과 반대인 전자기파의 성분의 진행 속도가 서로 달라져서 최종적으로는 전자기파가 진동하는 편광면 자체가 회전하게 된다. 이런 현상을 패러데이 회전(Faraday rotation)이라고 하는데 이 회전각은 전자의 밀도 및 자기장의 세기와 비례하므로 이를 이용하면 전자의 밀도는 물론 자기장의 세기까지도 구할 수 있다. 이런 방법을 편광 진단법(polarimetry)이라고 한다. 또한 주파수에 비해 전자의 밀도가 매우 높은 경우에는 전자기파가 마치 금속면에 부딪힌 것처럼 반사되어 되돌아오게 되는데 이 현상을 이용하면 레이더로 멀리 떨어진 물체의 위치를 감지하는 것과 마찬가지로 해당하는 전자 밀도의 위치를 알 수 있게 된다. 레이더보다 좀 더 좋은 점은 레이더는 항상 금속의 표면에서만 반사되지만 이 방법은 주파수를 바꾸어주면 반사되는 전자의 밀도도 변화하므로 플라즈마의 깊은 곳까지 침투하여 위치 정보를 알아 올 수 있다는 점이다. 이렇게 하여 전자 밀도의 분포를 측정하는 방법을 반사 진단법(reflectometry)이라고 한다.

그 밖에도 다양한 진단 장치들이 있지만 마지막으로 산업용 플라즈마의 진단에도 널리 쓰이고 있는 정전 탐침(electric probe) 진단법을 간단히 소개하고 마치도록 하겠다. 플라즈마의 경계 부분에 플라즈마와는 다른 전위를 갖는 주사기처럼 생긴 탐침을 넣으면 이 탐침을 통해 플라즈마에 있던 전자가 뿔뿔히 나오거나 거꾸로 플라즈마 내로 전자가 주입되게 되는데 그 양은 탐침에 흐르는 전류의 크기로 나타난다. 탐침에 걸리는 전위를 변화시켜가며 흐르는 전류의 양을 분석해보면 플라즈마의 물성을 알 수 있는데 예를 들면 전자의 온도가

높으면 더 적은 전위차에도 민감하게 반응하며 전자의 밀도가 높으면 한꺼번에 들어올 수 있는 전자의 양이 많아진다는 식이다. 이 방법은 간단한 측정으로 전자의 온도나 밀도 등 여러 물성을 측정할 수 있지만 분석 결과가 플라즈마 모델에 의해 크게 좌우되며 플라즈마의 안쪽은 측정이 어렵다는 단점이 있다.

### 토카막에 필요한 진단 장치

토카막에 필요한 진단 장치의 개수는 경우에 따라 다르지만 국제열핵융합실험로(ITER: International Thermonuclear Experimental Reactor)<sup>[2]</sup>를 비롯하여 JET,<sup>[3]</sup> DIII-D,<sup>[4]</sup> JT-60<sup>[5]</sup>와 같은 대형 토카막에는 적게는 수십 종에서 많게는 백 종 이상의 진단 장치들이 설치된다. 이렇게 많은 종류의 진단 장치가 필요한 것은 앞에서 살펴보았듯이 플라즈마를 진단하는 원리가 다양한 것도 한 이유지만 같은 원리로 같은 물성을 측정한다고 해도 어디를 주목하느냐에 따라 장치의 구성이 달라지기 때문이다. 예를 들어 국부적인 자기장의 크기를 측정하는 코일에는 자장 탐침(magnetic field probe)과 미르노프 코일(Mirnov coil)의 두 가지가 있는데 전자는 자기장의 크기를 보다 정확하게 측정하기 위해 코일의 턴 수를 늘려 흐르는 전류를 증가시킨 장치인데 반해 후자는 빠른 속도의 자기장 변화를 측정하기 위해 코일의 턴 수를 줄여 인덕턴스(inductance)를 감소시킨 장치이다. 분광 진단법의 경우에도 측정 해상도와 시간 해상도, 공간 해상도는 항상 상보적인 관계에 있어서 어느 한 가지 해상도를 높이면 다른 해상도는 감소할 수밖에 없으므로 용도에 따라 장치의 구성을 달리해야 한다. 전체 플라즈마를 볼 것인지 아니면 중심부나 경계 쪽을 집중하여 볼 것인지에 따라서도 장치가 달라진다. 또한 각각 장치의 특성이 다르므로 한 가지 물성을 여러 장치가 동시에 측정하여 서로 비교하는 것이 더 좋은 결과를 얻는데 도움이 된다. 예를 들어 전자 밀도의 경우 톱슨 산란 진단은 전자 밀도의 상대적인 분포를 측정할 수 있는데 비해 밀도의 절대값을 정확하게 측정하기 위해서는 지속적인 교정(calibration) 작업이 필요하다. 반면에 간섭계는 분포는 측정할 수 없지만 절대값은 비교적 정확하게 측정할 수 있다. 따라서 이 두 가지 진단법을 병행하면 측정된 전자 밀도 분포

#### 참고문헌

[2] <http://www.iter.org/>.

[3] <http://www.jet.efda.org/>.

[4] <https://fusion.gat.com/global/DIII-D>.

[5] <http://www-jt60.naka.jaea.go.jp/>.

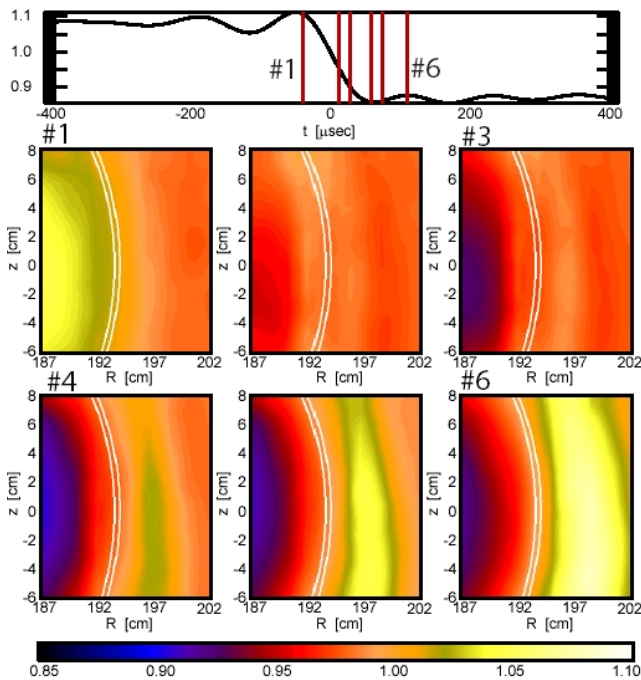


그림 7. TEXTOR 장치에서 ECEI 시스템으로 측정된 전자 온도의 2D 이미지. (출처: Visualization Diagnostic on KSTAR, N.C. Luhmann, Jr. (2004)).

값의 신뢰도를 높일 수 있다. KSTAR에는 현재 초기 플라즈마를 진단하기 위한 기본적인 자기장 진단계<sup>[6]</sup>를 비롯하여 전자 밀도 및 온도를 측정하기 위한 간섭계<sup>[7]</sup>와 ECE 복사계,<sup>[8]</sup> 플라즈마 상황 및 불순물을 측정하기 위한 분광계와 카메라 시스템<sup>[9]</sup>이 설치되어 있다. 이후 가열 장치를 비롯한 부대 장치의 성능 향상과 이에 따른 실험 계획에 맞추어 볼로메터 진단계, 엑스선 결정 분광계(XCS: X-ray Crystal Spectrometer),<sup>[10]</sup> 무른 엑스선 진단계(Soft X-ray Array),<sup>[11]</sup> 톱슨 산란 진단계, 원적외선 간섭계/편광계(Far-infrared interferometer/polarimeter),<sup>[12]</sup> 전하 교환 분광계 등 다양한 진단 장치들이 추가로 설치될 계획이다.

과거의 핵융합 연구가 주로 장치의 성능 향상을 통해 플라즈마의 밀도 및 온도, 지속 시간 등 핵심적인 물성값을 증가 시키는데 집중되어 왔다면 최근에는 플라즈마에 대한 깊은 이해를 통해 보다 안정적인 물성 분포를 찾고 고속의 진단 및 제어 시스템을 통해 이러한 분포 구조를 유지시키는 것에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다.<sup>[13]</sup> 이에 따라 진단 장치 역시 단순히 물성을 측정하는 것이 아니라 보다 빠른 속도로 물성의 공간 분포를 측정할 수 있는 능력이 요구되고 있다. 중성입자빔을 이용하여 밀도의 요동 분포를 측정하는 BES 시스템<sup>[14]</sup>이나 이미징 시스템을 이용하여 전자 온도의 2차원 분포를 측정하는 ECEI(Electron Cyclotron Emission Imaging) 장치<sup>[15]</sup>들이 최근 개발되어 이와 같은 연구를 뒷받

침하고 있으며 기타 다른 진단 장치들도 시간 및 공간 분해능을 높이기 위한 연구가 계속되고 있다.(그림 7)

한편 핵융합 장치들이 점점 실제로 에너지를 생산할 수 있는 상업용 핵융합로에 가까이 가면서 토카막 내부의 온도가 높아지고 많은 중성자들이 쏟아져 나오게 됨에 따라 플라즈마와 직접 대면하는 진단 장치들 역시 이러한 환경에 견딜 수 있는 소재 및 기술로 재무장해야 하는 것도 당연한 과제 중 하나다. 궁극적으로 핵융합 발전소가 건설된다면 아마도 이러한 환경에 견디면서 지속적으로 신뢰성 있는 측정을 수행하는 것이 진단 장치의 가장 중요한 조건이 될 것이다. 또한 플라즈마의 물성 분포 전체를 정밀하게 측정하기 보다는 플라즈마의 유지에 핵심적인 몇몇 신호들을 재빨리 체크해 내고 이에 대응하는 진단 장치들을 개발하는 것이 새로운 목표가 될 것이다.

### 맺는 말

국가핵융합연구소는 우리나라 핵융합 연구의 중심으로 인류가 직면한 에너지 문제를 궁극적으로 해결할 수 있는 핵융합 연구에 역량을 집중하는 한편 플라즈마 연구를 통해 기초 과학 및 산업 기술의 발전에 일조하기 위해 노력하고 있다. 아직까지 우리나라의 핵융합 연구 인프라는 선진국에 비해 많이 부족한 것이 사실이지만 KSTAR가 완공됨에 따라 앞으로는 세계적인 핵융합 기술 강국이라는 목표 달성을 위해 플라즈마 연구의 기본이 되는 진단 기술의 개발 및 발전에 더욱 박차를 가할 것이다.

### 참고문헌

- [6] S. G. Lee and J. G. Bak, Rev. Sci. Instrum. **77**, 10E306 (2006).
- [7] Y. U. Nam, M. S. Cheon, M. Kwon and Y. S. Hwang, Rev. Sci. Instrum. **74**, 1613 (2003)
- [8] S. H. Jeong, I. Y. Kim and C. K. Hwang, Rev. Sci. Instrum. **74**, 1433 (2003)
- [9] Jinil Chung and D. C. Seo, Rev. Sci. Instrum. (to be published)
- [10] S. G. Lee, J. G. Bak, U. W. Nam and M. K. Moon and J. K. Cheon, Rev. Sci. Instrum. **78**, 063504 (2007)
- [11] Junghee Kim and Wonho Choe, Rev. Sci. Instrum. **75**, 3974 (2004)
- [12] M. S. Cheon, Y. U. Nam, J. H. Ha and Y. S. Hwang, Rev. Sci. Instrum. **75**, 3402 (2004)
- [13] K. H. Burrell, Rev. Sci. Instrum. **72**, 906 (2001)
- [14] George R. McKEE *et al.*, Plasma and Fusion Research **2**, S1025 (2007)
- [15] T. Munsat *et al.*, IEEE Trans. on Plasma Science **33**, 466 (2005)