핵융합을 위한 고온 플라즈마 진단의 고급화

DOI: 10.3938/PhiT.19.046

박 현 거

Advanced Diagnostics for High Temperature Plasmas for Fusion Science

Hyeon K. PARK

Global energy consumption is increasing exponentially due to the explosive world population growth and the energy-intensive industrialization. Fossil fuels soon cannot sustain the large scale energy demand due to environmental problems and limited reserves. For a half century much progress has been made to realize the nuclear fusion, the Sun's energy source, on the Earth as an ultimate solution to this energy problem. Its realization is coming close through the tokamak, a device which confines high temperature plasmas using magnetic fields. Magnetically confined plasmas suffer from a variety of complex instabilities and understanding of the underlying physics is essential in order to achieve a practical nuclear fusion. The POSTECH fusion plasma research center develops advanced diagnostic devices which measures 2D physical properties of the high temperature plasmas. These devices will contribute to the establishment of the first principle based physics of the steady state tokamak plasma research such as the KSTAR.

폭발적인 인구 증가와 에너지 집약적인 산업화 추세로 말미암아 현대 인류가 사용하는 에너지의 양은 기하급수적으로 증가하고 있다. 화석 연료는 환경적인 문제와 제한된 매장량으로 인하여 더 이상 인간의 대규모 에너지 수요를 감당하지 못하게 될 것이다. 화석연료의 고갈을 대체할 수 있는 대용량 환경친화적 에너지원의 개발이 인류의 당면 과제이다. 지난 반세기 동안 이러한 에너지 문제를 궁극적으로 해결할 수 있는 대체 자원으로서 태양의 에너지 원천인 핵융합을 지구상

저자약력

박현거 교수는 1984년에 UCLA에서 플라즈마 물리/진단분야 박사학위를 마치고 2007년까지 프린스턴 대학 플라즈마 물리 연구소에서 재직하였다. 현재 포항공대 물리학과 교수로 재직 중이며 핵융합 플라즈마 진단 및 정상상태 연구센터 센터장을 겸하고 있다. (hyeonpark@postech.ac.kr)

Fig. 1. Steep transition in world population and energy consumption in the 21st century. Global energy consumption cannot be sustained by fossil fuels due to environmental problems and limited reserves. Development of alternative energy sources is urgent to replace the fossil fuels.

에서 구현하려는 연구가 발전을 거듭해 왔으며, 현재 토카막이라는 자기장을 이용해 고온 플라즈마를 가두는 장치를 통해 실현 단계에 다다르고 있다. 실용적인 핵융합을 이루기 위해서는 자기장에 갇힌 플라즈마가 나타내는 다양하고 복잡한 불안정 현상을 물리적으로 규명해야 한다. 포스텍 핵융합 플라즈마 연구소에서는 이를 위하여 고온 플라즈마의 물성을 2차원적으로 정확하게 측정할 수 있는 첨단 진단 장치들을 개발하고 있으며 이 장치들은 우리나라의 KSTAR를 비롯한 토카막 플라즈마 물리 연구에 활용될 것이다.

머리말

오늘날 우리 세대는 에너지 집약적인 문명 속에 살고 있다. 우리가 당연히 누리고 있다고 생각하는 많은 문명의 이기들은 산업 혁명 이전에는 상상하기 어려웠던 많은 양의 에너지를 필요로 한다. 이와 더불어 폭발적인 인구 증가와 그로 인한 식량 및 물질 소비의 급증으로 말미암아 현대 인류가 사용하는 에너지의 양은 기하급수적으로 증가하고 있다. 그러나 산업 혁명 이후 지금까지 주 에너지원으로 사용돼 온 화석 연료로는 환경적인 문제와 제한된 매장량으로 인하여 그림 1에서 보여 주듯이 새로운 대규모 에너지 개발에 인류의 존망이 달려있다.

환경친화적인 대체 에너지 자원으로서 태양력, 풍력, 바이오 에너지 등의 개발이 추진되고 있지만 에너지 저장문제가 해결 되더라도 대규모 산업에 필요한 에너지를 감당하기에는 부족

하다. 대규모 환경친화적 대체 에너지가 개발될 때까지 탄소가스의 배출이 없는 원자력발전이 병행되어야 할 것이다. 하지만 인구밀도가 높고 일조 시간과 바람이 한정되어 있는 한국의 지형학적인 면을 고려할 때 장기적인 대책이 보이지 않는다.

이 같은 에너지 문제를 궁극적으로 해결하기 위하여 지난 반세기 동안 태양과 같은 수많은 별들의 에너지 원천인 고온 핵융합 반응을 지구상에서 구현하기 위한 연구가 이루어져 왔으며 이제 실현 단계에 가까워지고 있다. 현재 진행되고 있는 국제 핵융합 프로젝트 ITER의 성공이 반세기 안에 이를 실현할 수 있는 지름길이다. 지구상에서 가능한 고온 핵융합 반응은 수억 도 이상의 이온화된 기체, 즉 전자와 원자핵이 분리된 상태인 플라즈마 상태에서 일어난다. 태양에서는 중력이 고온의 플라즈마를 가두는 역할을 하지만 지구상에서는 플라즈마를 가두기 위해 수 테슬라(Tesla)의 강력한 자기장이 사용된다. 그러나 자기장에 갇힌 고온의 플

라즈마는 높은 에너지 밀도 때문에 다양한 종류의 불안정성을 겪게 되며 그로 인한 에너지 누수 현상이 발생하게 된다. 궁극의 에너지자원인 핵융합 발전을 좀 더 효율적으로 만들기 위해서는 이에 대한 원인 규명을 통해 안정적인 플라즈마 운전을 위한 대응책 개발이 반드시 필요하다.

하지만 자기장에 갇힌 고온의 플라즈마의 운동은 어느 복잡계보다 더 복잡하고 온도가 수십억 도가 넘는 플라즈마의 물성 진단은 고도의 기술이 필요하다. 정확한 플라즈마 물리 규명에 필요한 진단 기기들의 개발이 충분치 않기 때문에 혼하지는 않지만 치명적인 플라즈마의 불안정성 연구가 늦어지고 있다.

포스텍 핵융합 플라즈마 연구센터에서는 첨단 영상 진단 장치 개발을 통해 고온의 플라즈마에서 일어나는 불안정성과 에너지 및 입자 수송 현상 등 플라즈마 물성 문제를 연구하고 있다. 이 글에서는 플라즈마 가둠 장치인 토카막(Tokamak)에 대해 간략히 소개하고, 플라즈마 전자 온도 변화를 측정하기 위한 장치인 ECE(Electron Cyclotron Emission) 영상 진단 시스템과 플라즈마 전자 밀도 변화를 측정하기 위한 장치인 MIR(Microwave Imaging Reflectometry) 시스템에 대해 설명한다. 또한 이 진단 장치들이 활용될 주요 연구 분야에 대해 소개한다.

Fig. 2. (a) Schematic of tokamak structure. The magnetic field for plasma confinement is produced by a set of toroidal and poloidal field coils. (b) Inside view of the JET tokamak. (c) ITER tokamak currently being constructed at Cadarachi, France. (d) KSTAR tokamak. Indicated by the circle is the ECE imaging system installed on the port H.

토카막(Tokamak)

토카막은 자기장을 이용하여 수억 도 이상의 고온 플라즈마를 가둘 수 있는 가장 대표적인 장치이다. 유럽의 JET, 미국의 TFTR, 그리고 일본의 JT-60U 토카막들을 통해 과학적인 균형점 ($Q=출력/입력 \sim 1$)을 달성하였고 이 과정에서 고온 플라즈마 연구는 비약적인 발전을 하였다. 다음 단계는 공학적인 균형점 ($Q=500$ 이상)을 달성하는 것이고 이를 통해 실용적인 핵융합로 건설이 가능해진다. 이 균형점에 도달하는 것이 가능한지 과학적으로 규명하기 위하여 현재 $Q=10$ 을 목표로 현재 우리나라를 비롯한 세계 7개국 (유럽, 일본, 미국, 러시아, 중국, 인도)이 공동으로 ITER 토카막을 건설하고 있다. 특히 우리나라는 최근에 초전도 자석을 이용한 KSTAR 토카막 건설을 완료하고 운전을 시작하면서 ITER 토카막 건설 및 운영에 기여를 하고 있다. 그림 2는 토카막의 기본 구조, JET 토카막의 단면, ITER의 구조, 그리고 KSTAR의 현재 모습이다.

도넛 형태의 자기장 구조에 갇힌 고온의 토카막 플라즈마는 에너지 밀도가 높은 일종의 유체로 생각할 수 있다. 그러나 일반 유체와 달리 토카막 플라즈마 내부에는 수백 ~ 수천 kA의

높은 전류가 흐르며 종종 초속 수백 km 속도로 플라즈마가 한 방향으로 돌기도 한다. 플라즈마 유체의 독특한 성질을 설명하는 이론을 자기유체역학(MHD: Magneto-Hydrodynamics)이라 한다. 토카막 플라즈마 내부에는 또한 다양한 파동(Wave) 현상이 존재하며 국부적인 온도 차이로 인하여 다양한 섭동(Turbulence) 현상이 나타난다. 플라즈마 파동 또는 섭동은 더 큰 형태의 자기유체역학적인 불안정 현상(MHD Instabilities)으로 발전하기도 하는데 대표적인 것으로 Sawtooth, Neoclassical Tearing Mode(NTM), Edge-Localized Mode(ELM) 등이 있다. 이들 불안정 현상들이 시간이 지남에 따라 점차 커지게 되면 플라즈마가 갑자기 자기장을 뚫고 붕괴(Disruption)하는 상황으로 발전되기도 한다. 따라서 이러한 불안정 현상과 그로 인한 에너지 및 입자 누수 현상은 핵융합 플라즈마의 중요한 연구 주제로 인식되어 왔다.

ECE(Electron Cyclotron Emission) 영상 진단 시스템

이러한 불안정 현상들을 근본적으로 3차원적인 공간 구조에서 발생하는 현상들로서 이를 설명하기 위한 많은 이론 모델들이 제안되었지만 기존의 1차원적인 진단 관측을 통해서만 이론이 예측하는 바를 명확하게 검증할 수 없었다. 따라서 이런 한계를 극복할 수 있는 2차원적인 진단이 필요하다.

전자 온도의 일차원적인 분포를 측정하는 장치로서 ECE 복사계(Radiometer)라는 장치가 많은 토카막에서 활용되어 왔는데, 이는 자기장에 갇혀 사이클로트론(Cyclotron) 궤도를 도는 전자로부터 방출되는 전파의 세기가 전자 온도에 비례하고 주파수가 자기장의 세기에 비례한다는 점을 이용한 장치이다. 1차원 진단을 2차원으로 확장한 장치인 ECE 영상 진단 시스템은 다수의 ECE 복사계와 카메라 렌즈와 비슷한 구조의 광학계를 결합하여 만든 장치로서 독일의 TEXTOR 토카막에 설치되어 처음으로 Sawtooth 현상으로 인한 플라즈마 온도 변화를 실시간 2차원 영상으로 보여주었다(그림 3). Sawtooth 현상은 플라즈마 중심부의 전자온도가 점진적 상승과 급격한 하강을 주기적으로 반복하는 현상을 일컫는다. 전자온도의 급감은 플라즈마 중심부에서 자기장 재결합(Magnetic Reconnection)이 일어났음을 반영하는데, 자기장이 재결합된 부분을 통해 중심부의 에너지가 주변부로 빠져 나갈 수 있게 된다. 태양풍 등 다양한 천체 물리 환경에서도 유사한 자기장 재결합 현상들이 흔히 관찰된다. Sawtooth 현상 그 자체로는 플라즈마에 위협적인 영향을 주지는 않지만 이것이 플라즈마 붕괴를 촉발할 수도 있기 때문에 발생 원인에 대한 정확한 이해와 제어 방법 개발이 필요하다.

KSTAR 토카막에 설치된 ECE 영상 진단 장치의 구조와 사양을 각각 그림 4와 표 1에 설명하였다. 이 장치에서는 측

Fig. 3. Sawtooth oscillation images of the TEXTOR plasma measured by an ECE imaging system. Colors represent relative changes in the electron temperature. Frames 4~6 clearly show the heat flow from the plasma center (right side) to the outside (left side). Frame 8 shows the cooled plasma center after the heat dissipation.

정 정밀도 개선과 관측 영역 확장이 이루어졌을 뿐만 아니라 TEXTOR 장치에서 불가능했던 플라즈마 중심부 양측의 동시 관측이 가능해졌다. 이로써 MHD 현상의 구체적인 발생 메커니즘을 밝히는 데 중대한 기여를 할 것으로 기대된다.

MIR (Microwave Imaging Reflectometry) 시스템

플라즈마 불안정 현상으로 인해 촉발된 에너지 및 입자의 수송(Transport) 현상은 핵융합 플라즈마 물리의 중요한 문제로 최근에 활발하게 연구되고 있다. 수송 현상은 핵융합로의 크기를 결정하는 중요한 요소로서 수송 현상의 물리적 이해를 통해 소규모 핵융합로의 가능성을 확인할 수 있다. 여러 핵융합 장치에서 관찰된 수송 현상의 속도는 초기 이론들이 예측한 값들보다 10배에서 100배 정도 크게 나타났다. 이러한 이론과 실험의

Fig. 4. ECE imaging system installed on the KSTAR tokamak. The observation area is indicated by HFS (high field side) and LFS (low field side) inside the plasma cross-section at the top left corner. The ECE imaging system includes the optics consisted of plastic lenses, heterodyne antenna arrays and two high frequency (~100 GHz) sources indicated by BWOs, and RF electronics for processing the received ECE signals (not shown in the figure).

Table 1. Characteristics of the KSTAR ECEI system.

Spatial Coverage	Simultaneous coverage of low- and high-field sides (LFS and HFS) Wide vertical zoom range: 30 – 90 cm Radial coverage (~8 GHz): ~15 cm in LFS and ~10 cm in HFS.
Number of Channels	24 vertical x 8 radial channels in each array. Total of 382 channels
Spatial Resolution	Vertical resolution ~1 – 3 cm Radial resolution ~1 – 2 cm
Temperature Resolution	Measurable relative temperature change = $\delta T_e / T_e \approx 2\%$
Time Resolution	2 μ sec

불일치를 해결하기 위하여 여러 연구자들이 미세 불안정(Micro-instability)에 의한 비정상 수송(Anomalous Transport)이라는 새로운 모델을 개발하였다. 이런 모델들의 실험적인 검증은 플라즈마 밀도의 요동을 정밀하게 측정함으로써만 가능한데 이 분야에 마이크로파 반사계(Microwave Reflectometry)와 산란계(Scattering System)가 많이 이용되어 왔다. 일반 마이크로파 반사계는 한 지점에서의 밀도 변화만 측정할 수 있으며 밀도 요동이 큰 경우에는 측정 자체가 불가능하다는 한계를 갖고 있다. 이러한 약점을 보완한 마이크로파 영상 반사계(MIR)는 ECE 영상 장치와 비슷하게 플라즈마의 밀도 요동의 공간적인 구조를 측정할 수 있도록 개발된 진단 장치이다. MIR 장치는 플라즈마 내부에 존재하는 반사면으로부터 산란되어 되돌아오는 마이크

Fig. 5. Schematic of the MIR system under laboratory testing. A thin metallic plate has been used to simulate the reflecting cut-off surface inside the plasma. The effect of the curvature of the reflecting surface and the optical configuration on the phase of the reflected signal is being investigated.

로파를 광학계를 이용하여 최대한 수집하여 반사면의 위상 정보, 즉 밀도 요동 구조를 측정한다. 우리 연구실에서는 이러한 진단 원리에 대한 기본적인 개념을 확인하고 KSTAR에 적합한 장치 개발을 위하여 다양한 실험실 테스트를 진행하고 있다. 특히, 그림 5에서 보여주듯 반사면의 곡률과 광학계의 특성이 반사파의 위상에 미치는 영향에 대해 연구하고 있다. KSTAR용 MIR 장치는 밀도 요동의 2차원 분포를 측정할 수 있도록 다중 주파수 소스를 개발하여 채용할 예정이다.

맺음말

고온 핵융합 플라즈마의 물성 진단에 활용될 ECE 영상 진단 장치 및 MIR 장치에 대해 소개하였다. 이들 영상 진단 장치들은 KSTAR 토카막에 설치되어 플라즈마에서 발생하는 MHD 불안정 현상 및 수송 현상을 연구하는 데 활용될 것이다. 특히, ECE 영상 진단 장치는 올해 KSTAR 운전부터 가동되어 플라즈마 단면의 2차원 전자온도 영상을 제공하게 될 것이다. 또한 멀지 않은 미래에 3차원적인 전자온도 측정을 위하여 두 번째 ECE 영상 진단 장치를 개발할 계획도 가지고 있다. 2011년에는 다중 주파수를 채용한 MIR 시스템이 KSTAR에 설치될 예정이다. 포스텍 핵융합 연구센터에서는 이런 첨단 영상 진단 장치 개발과 이들을 활용한 토카막 플라즈마 물리 연구를 통하여 토카막의 성능 향상과 미래 핵융합 사업에 필요한 인력 양성에 기여하고 있다.