

## KAIST-TOKAMAK 플라즈마 방전 자동화시스템 개발

권기청 · 김재현 · 선창래 · 전상진 · 허승희 · 문세연 · 이태상 · 최원호 · 장홍영 · 최덕인  
한국과학기술원 물리학과, 대전 305-701

(2000년 4월 6일 받음)

KAIST-TOKAMAK에서 재현성있는 플라즈마의 발생 및 실험효율의 증대를 위하여, 각종 코일 전원시스템의 제어를 통한 플라즈마의 발생에서부터 여러 진단계에서부터 나오는 실험자료의 수집까지 일련의 과정을 자동화하는 실험 자동화 운영시스템을 개발하였다. 이 시스템의 골격은 32 채널짜리 시간지연 발생기(Delay generator) 한 대와 PC 한 대로 구성되어 있다. 개발된 운영자동화 시스템을 이용하여 한 사람의 운전자가 KAIST-TOKAMAK 전 시스템을 운영하여 플라즈마의 발생에서부터 실험자료의 수집까지 처리할 수 있게 되어 적은 노력과 시간으로 효율적인 실험이 가능하게 되었다.

### I. 서 론

다른 나라의 여러 중, 대형 토카막에서와 같이 KAIST-TOKAMAK에서 운전자동화를 위한 시스템의 개발에 대한 필요성은 실험의 효율을 높이기 위한 뿐만 아니라 이에 못지 않게 중요한 재현성 있는 토카막 플라즈마의 발생에 있다. KAIST-TOKAMAK에서 플라즈마의 발생 및 제어를 위해 필요한 자기장을 발생시키는 전원시스템은 축전기뱅크(Capacitor bank)이다. 본 연구에서 논의하는 자동 운영시스템이 개발되기 전에는 운전자가 수동으로 각 축전기뱅크를 요구되는 충전전압으로 충전하였기 때문에 매 방전 때 마다 일정한 충전전압을 유지하는 것이 재현성있는 플라즈마를 얻는데 있어 중요하다. 그러나 정확도를 유지하기 위해 많은 노력을 기울인다 해도 때때로 축전뱅크의 충전전압이 약간씩 달라지고는 해서, 특히 재현성있는 플라즈마가 요구되는 실험에서 이것은 실험에 오차를 주는 근본요인이 되었다. 이점 외에도 토카막 운전자가 모든 전원시스템을 수동으로 제어하는데서 기인하는 피로와 이에 따른 집중도의 저하는 결국 연구효율의 저하를 낳게 되었다. 따라서 이러한 점들이 KAIST-TOKAMAK 운전자동화 시스템의 개발을 위한 동기가 되었다.

KAIST-TOKAMAK은 크게 전원시스템과 진공시스템, 플라즈마 진단계 및 자료수집계로 구성되어 있다. 전원시스템 [1-6]은 플라즈마를 발생시키기 위한 저항가열 시스템, 토로이달자기장 발생 시스템, 플라즈마의 위치를 제어하기 위한 폴로이달 자기장인 수평 및 수직자기장 발생 시스템, 전이온화(Pre-ionization)를 위한 필라멘트 및 마그네트론 구동 전원 시스템, RF를 이용한 전이온화 및 플라즈마 가열을 위한 RF전원 시스템 등으로 구성되어 있다.

KAIST-TOKAMAK의 본체는 그림 1에서와 같이 진공용기와 저항가열 코일, 토로이달자기장 코일, 폴로이달자기장 코일(수평 및 수직자기장 코일)로 구성되어 있다. 진공용기의 주반경 및 부반경은 각각 53 cm/17 cm이고, 플라즈마

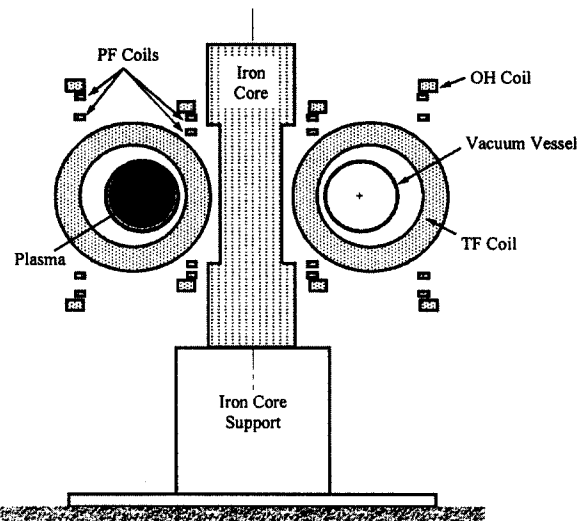


그림 1. KAIST-TOKAMAK의 본체 구조도.

의 부반경은 14 cm이다. 토로이달 자기장은 최대 0.5 T, 플라즈마 전류는 최대 40 kA, 그리고 최대 플라즈마 유지시간은 약 100 ms이고, 안전인자(Safety factor:  $q_a$ )는 3 이상이다.

플라즈마 진단장치로는 다수의 정전탐침(Electrostatic probe), 로고프스키(Rogowski) 코일, 자속 루프(Flux loop), 자장탐침(Magnetic pickup loop)등과 같은 자장진단계, 마이크로파 간섭계, 잔류기체분석기(RGA), 분광기 및  $H_\alpha$  방출선을 측정하기 위한 광학적 진단계, 그리고 플라즈마의 단면을 촬영하기 위한 CCD 카메라 등이 있다.

자료수집계는 방전 후 여러 진단장치로부터 한정된 짧은 시간 안에 VXI시스템을 통해 실험 자료를 얻을 수 있게 구성되어 있다. 자료수집 프로그램으로는 VEE<sup>TM</sup> 소프트웨어와 Origin<sup>TM</sup>을 서로 결합하여 제작한 프로그램 [7]과 Labwindow<sup>TM</sup>를 이용하여 만든 KDAS(KAIST-TOKAMAK Data Acquisition System) [8]를 필요에 따라

선택하여 사용한다. 위에 짧게 기술한 KAIST-TOKAMAK의 모든 시스템은 한 대의 486 PC를 이용한 프로그램화된 일련의 과정으로 제어하여 실험의 자동화 시스템을 구현하였다.

### II. KAIST-TOKAMAK의 동작체계

KAIST-TOKAMAK의 시간에 따른 전체적인 동작체계는 그림 2와 같다. 그림에서 주어진 시간축에서 플라즈마 방전은(46 - 47) ms에서 시작하여 약(80 - 100) ms 동안 지속된다. 시간 0 s는 저항가열 코일에 전류가 흐르기 시작하는 시점이다. 플라즈마의 발생 및 평형상태의 지속을 위해서는 저항가열 코일, 토로이달자기장 코일 및 폴로이달자기장 코일에 전류를 흘려주어야 한다. 앞 절에서 언급한 대로 이를 위해서 먼저 각 코일전원인 축전기뱅크에 각각의 충전전압으로 충전시켜야 하는데, 방전이 시작되기 전 약(100 - 120) s에 걸쳐 충전되는 이 단계를 충전부(Charging phase)라 한다.

일단 모든 코일 축전기뱅크의 충전이 완료되면, 운전자에 의해 주어지는 트리거(Trigger) 신호에 따라 주어진 시각에 각 코일에 전류가 흐르고 플라즈마가 발생, 유지된다. 이 시기를 방전부(Discharging phase)라 부르는데, 각 축전기뱅크에서 코일로 전류가 흐른 후 남은 전력을 덤프(Dump) 저항으로 흘려 축전기뱅크를 완전히 방전시키는 시기까지 포함하여 방전시작으로부터 약 0.5 s정도 후 완료된다. 방전부 동안 각 코일에 흐르는 시간에 따른 전류모양을 그림 2에 나타내었다. 여기서  $y$ -축의  $I_{OH}$ ,  $I_{TF}$ ,  $I_{HF}$ ,  $I_{VF}$ 는 각각 저항가열 코일에 흐르는 전류(kA), 토로이달 코일에 흐르는 전류( $\times 18.4$  kA), 수평자기장 코일에 흐르는 전류(A), 수직자기장 코일에 흐르는 전류( $\times 100$  A)이다. 참고로 KAIST-TOKAMAK의 저항가열 자속(Ohmic flux)은 약 0.18 wb이다.

플라즈마를 안정적으로 방전시키기 위해서는 저항가열 파워가 주어지기 전에, 즉 주 방전 전에 씨앗이 되는 표적 플라즈마를 발생시키는 전이온화가 필요한데, KAIST-TOKAMAK의 경우 500 W, 2.45 GHz 마그네트론을 작동시켜 발전된 마이크로파를 이용하여 절연파괴로 전이온화를

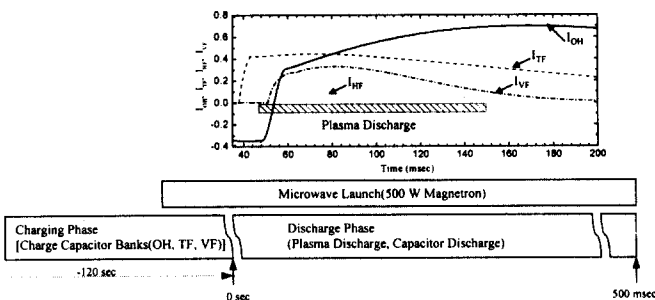


그림 2. KAIST-TOKAMAK의 동작 체계도.

한다. 마이크로파의 발전은 주 방전이 시작하기 전 약 200 ms부터 시작하여 플라즈마가 끝날 때까지 계속된다. [9]

### III. 시간지연 발생기(SN100)

본 논문에서 논의하는 KAIST-TOKAMAK 운전 자동화시스템의 핵심요소는 PC로 제어되는 시간지연 발생기이다. 실험에 이용한 시간지연 발생기는 Plus Scientific사의 SN100 펄스발생기(SN100 Sequencer)로, 높은 정확도와 자유스러운 시점(Flexible timing)의 32 채널 TTL 신호를 컴퓨터로 제어가 가능하며, 펄스의 간격은 1 s에서 1 ks까지 BNC 출력을 낼 수 있다. 또한 순환패턴과 중복패턴이 가능한 펄스시간 패턴을 만들 수 있으며, 총 패턴의 길이는 32768 시점까지 조절이 가능하다. 4 s에서 65535 ks까지 기다리는 기능(Wait function)은 시간발생기(Timer)로 동작하고 외부 펄스로 제어가 가능하다. 이 시간지연 발생기는 현재 486 PC로 프로그램화되어 제어되고 있다.

### IV. KAIST-TOKAMAK의 자동화 운영 시스템

그림 3은 KAIST-TOKAMAK의 자동화 운영 체계도이다. 자동화 운영 체계는 토카막의 두뇌에 해당하는 주 컴퓨터(486 PC)와 연결된 시간지연 발생기(SN100)로부터 고전력 전원시스템과 실험자료 수집계, 플라즈마 영상 촬영 및 저장계를 제어하여 주 방전 실험에서부터 실험자료 및 영상자료를 수집할 수 있도록 자동으로 운전하는 것이다. 고전력 전원 시스템을 쉽게 제어할 수 있도록 제어판넬과 시간지연 발생기사이 인터페이스 회로를 설계, 제작하였다.

전원 시스템의 체계는 그림 3에 나타난 것과 같이 제어방(Control room)에서 광섬유(Optical fiber) [10]를 통해 각 전원시스템을 제어하여 해당하는 코일에 흐르는 전류를 제어한다. 각 전원시스템은 수동 또는 자동으로 제어할 수 있도록 하였고, 각 코일 전류는 Ignitron, Thyristor, IGBT,

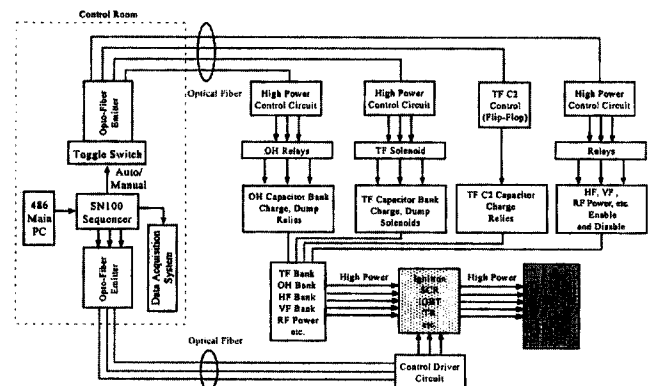


그림 3. KAIST-TOKAMAK의 자동화 운영 체계도.

TR 등의 제어소자를 통해 자동으로 제어될 수 있도록 하였다. 모든 제어소자들은 외부 잡음과 접지루프를 방지하기 위해 광섬유로 제어된다. 고전력 전원시스템을 제어할 때 직접 제어하지 않고 약전과 강전을 분리하여 약전을 먼저 제어하여 약전으로 강전을 제어할 수 있도록 하였다. 보통 약전과 강전의 기준은 600 V이나 여기서는 실험장치 상황으로 보아 300 V로 한다.

체계도의 흐름을 자세히 서술하면 다음과 같다. 제어방에서 제어판넬에 있는 제어스위치(Toggler switch)로 발광소자(MFOE71) [10]에 전기신호를 인가하여 광섬유로 고전력 제어회로의 입력단에 광신호를 보내면, 고전력 제어회로에서 각 전원시스템을 제어하는 약전 릴레이 및 솔레노이드(Solenoid) 스위치를 구동시킨다. 이 약전 릴레이 및 솔레노이드 스위치는 고전력의 접점을 지닌 강전 릴레이 및 솔레노이드 스위치를 조정한 후, OH 축전기뱅크, TF 축전기뱅크, PF 축전기뱅크의 충/방전을 제어하고 RF 전력 등을 사용가능 및 불가능(Enable and disable)하도록 제어한다. 여기서, 토로이달자기장 발생 전원의 TF C<sub>2</sub> 뱅크는 1 비트의 메모리용인 플립플롭(Flip-flop) [11]을 이용하여 릴레이로 충전된 후 자동으로 방전되도록 하였다. 제어판넬에서 각 전원시스템을 제어하는 일련의 과정은 운전자에 의해 조작되는 수동모드와 컴퓨터(486 PC)에 의해 제어되는 자동모드로 선택가능 하다. 수동방식은 모든 시스템의 점검 시 또는 어느 장치에 문제가 생길 경우, 시스템을 점검할 때 쓰이도록 하였다. 자동방식은 컴퓨터에 연결된 시간지연 발생기에서 제어패널의 제어스위치를 자동으로 제어할 수 있도록 되어 있고, 여러 가지의 방전모드에서 실험할 수 있도록 프로그램되어 있다.

한편, 각 전원 시스템에 충전되어 있는 고전력을 각 코일에 보내기 위해서 Ignitron, Thyristor, IGBT, TR 등 고전력 제어 소자를 이용하는 데, 이 고전력 제어 소자를 제어기 회로(Control driver)로 제어한 후, 토카막의 각종 코일 및 안테나에 인가한다. 시간지연 발생기에서 나온 제어신호(제어펄스)는 발광소자로 전기신호를 광신호로 변환된 후 광섬유를 통해 제어기 회로 입력단에 도달되어 제어기 회로를 동작시킨다.

그림 4는 제어판넬의 제어스위치와 시간지연 발생기 사이의 인터페이스 회로를 나타내는 데, 주전원 5 V로 모든 고전력을 제어하도록 설계되었다. 회로는 주전원에 연결하는 스위치(SM)를 이용하여 수동모드와 자동모드로 선택하여 전환할 수 있고, 수동이든 자동이든 광신호를 출력하는 발광소자(MFOE71)를 구동시켜 광섬유를 이용, 각 전원 시스템을 제어한다. 자동모드로 전환되었을 때는 시간지연 발생기의 출력신호(TTL 5V)가 트랜지스터를 통해 릴레이(S2-1에서 S2-28까지)를 구동시키면 발광소자가 구동되도록 하였다. 플립플롭을(4013) 이용하여 두 개의 10 μs짜리 펄스를 클럭 입력단(CLK)에 원하는 시간간격으로 입력하면 트랜지스터가 원하는 시간간격 만큼 동작된다. 또한 시간지연 발생기의

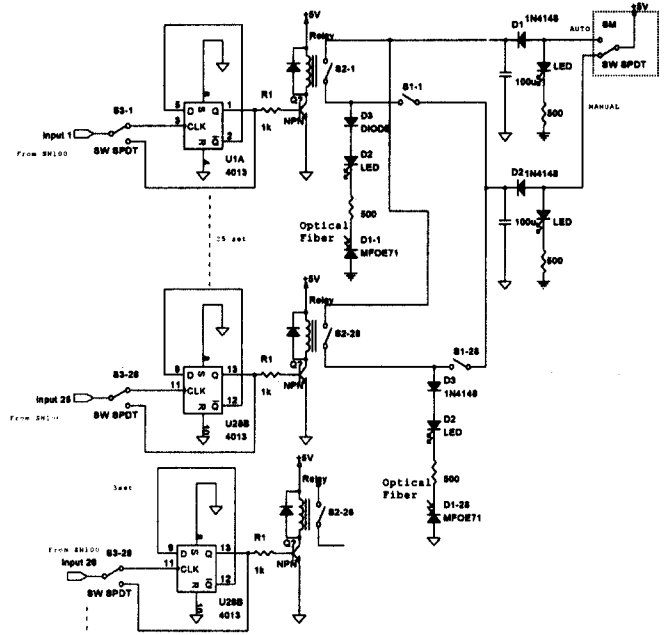


그림 4. 전원 시스템 제어를 위한 인터페이스 회로. 사각형의 점선안에 있는 스위치(SM)는 수동모드와 자동모드로 선택하여 전환할 수 있다.

출력신호가 트랜지스터에 원하는 시간간격 만큼의 동작 펄스 폭으로 트랜지스터에 입력(동작 펄스의 시작시점과 끝시점)하면 그 시간동안에 발광소자가 구동된다.

KAIST-TOKAMAK에서 고전력 전원시스템을 자동으로 제어하게 될 때 만약의 위험상황이 생기는 경우를 대비하기 위해, 전압을 비교하기 위한 비교기와 경보시스템을 설계하였다. 전원시스템 중 가장 위험한 상황은 상대적으로 충전전압이 낮은(450 V) TF C<sub>2</sub> 가 채 충전이 되기 전에 고전압(10 kV) 축전기뱅크인 TF C<sub>0</sub>의 전력이 TF C<sub>2</sub>의 제어소자인 SCR(6000 V)을 파괴하는 경우이다. 이 상황을 방지하기 위해 TF C<sub>0</sub>와 TF C<sub>2</sub>의 전압을 비교하기 위한 비교기와 경보 시스템을 제작하였으며, 구조도와 회로도도 그림 5와 6에 나타내었다. 이 회로도도 축전기뱅크의 충전전압이 둘 중 하나만 올라가는 경우를 선택하여 광결합 분리기(Opto-coupler)를 통해 경보기를 울리게 한다. 비교기는 LM311을 사용하였고, 비교기의 논리는 XOR(Exclusive OR)와 NAND 논리소자를 이용하였으며, 경보기의 경보시간을 조절하고 모니

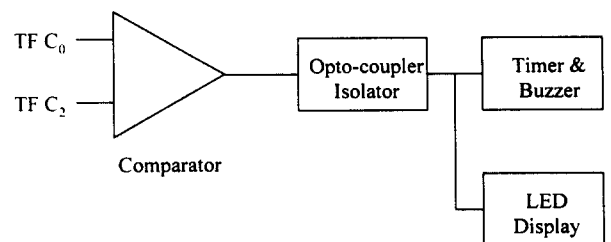


그림 5. TF C<sub>0</sub>와 TF C<sub>2</sub>의 전압을 비교하기 위한 비교기와 경보시스템의 구조도.

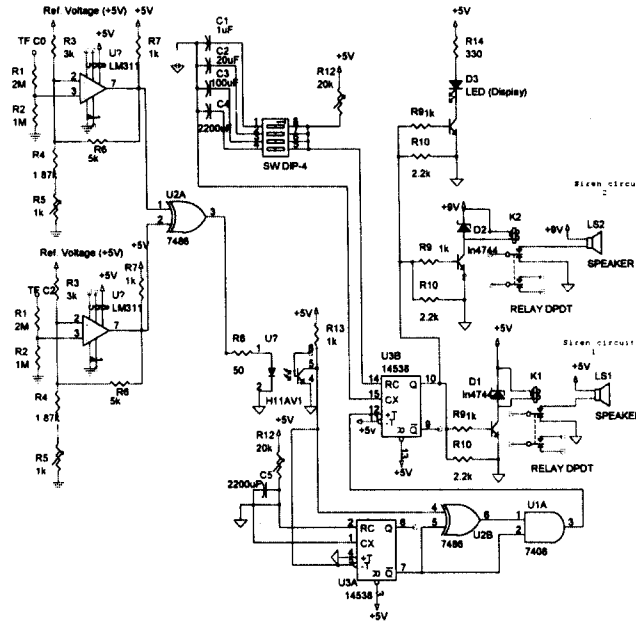


그림 6. TF C<sub>0</sub>와 TF C<sub>2</sub>의 전압을 비교하기 위한 비교기와 경보시스템의 회로도.

터하기 위한 펄스출력을 낼 수 있게 단안정 펄스 발생기인 14538을 사용하였다.

KAIST-TOKAMAK의 자동화 운영 시스템이 잘 동작하는지와 재현성이 있는 지를 알아보기 위해, 진공용기 내에 수소기체를 주입하지 않아 플라즈마가 발생되지 않을 때 각 코일 전원시스템을 약 10여회 동작시켜 코일에 흐르는 전류를 관찰하였다. 그림 7에서와 같이 저항가열 코일 전류( $I_{OH}$ ), 토로이달 코일 전류( $I_{TF}$ ), 수직자기장 코일 전류( $I_{VF}$ ) 및 수평자기장 코일 전류( $I_{HF}$ )는 거의 같은 곡선을 나타내어 재현성 있게 각 코일의 전류를 얻을 수 있다는 것을 알 수 있다.

그림 8은 진공용기내에 수소기체를 주입하여 플라즈마가 발생하였을 때에도 각 코일에 흐르는 전류는 거의 동일하다는 것을 보여주고 있다. 플라즈마가 사라지는 시점에서 보이는 약간의 차이는 플라즈마의 위치제어가 불안전하여 플라즈마의 전류에 의해 발생하는 에디전류가 각 코일에 발생하여 생기는 것으로 추정된다.

플라즈마 방전은 플라즈마 밀도 및 온도, 플라즈마 전류 및 위치 제어, 진공용기의 불순물, 수소기체의 압력등 플라즈마의 물성에 따라 매 실험마다 영향이 있다. 본 실험에서는 플라즈마 전류를 확인하여 재현성을 살펴보았다. 그림 9는 연속적으로 플라즈마를 방전하였을 때의 플라즈마 전류( $I_p$ )를 나타낸다. 플라즈마 전류도 대체적으로 재현성있게 발생되지만, 초기 플라즈마가 방전되기 시작하면서 플라즈마 전류가 증가하는 부분은 거의 재현성있게 보여주며, 플라즈마가 유지되는 부분과 플라즈마 전류가 사라지는 부분은 진공용기의 내벽 상태와 수소기체 주입방식등의 여러조건에 따라 약간씩 차이를 보인다. 이는 진공용기의 내벽과 플라즈마 사이의 상호작용, 수소기체 주입방식 등에 관해 앞으로 더 연구

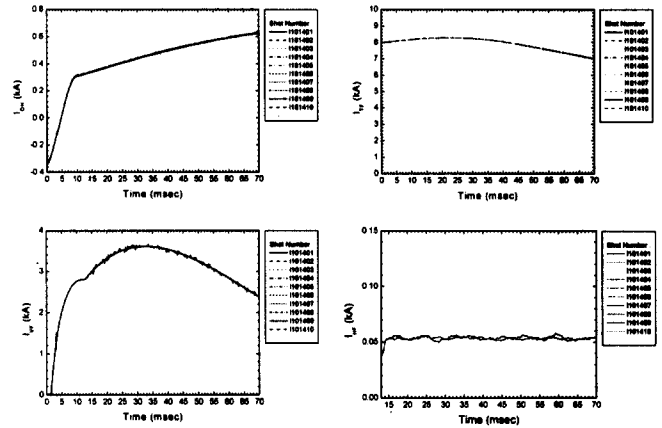


그림 7. 플라즈마가 없을 때 각 코일의 전류.  $I_{OH}$ 는 저항가열코일 전류,  $I_{TF}$ 는 토로이달자기장 코일 전류,  $I_{VF}$ 는 수직자기장 코일 전류,  $I_{HF}$ 는 수평자기장 코일 전류를 나타낸다.

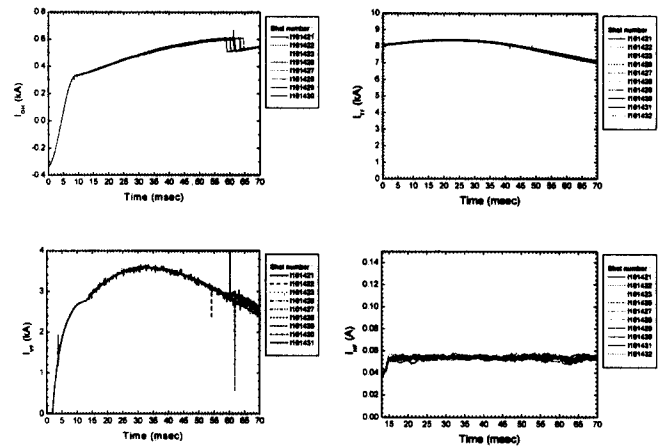


그림 8. 플라즈마가 있을 때 각 코일의 전류.

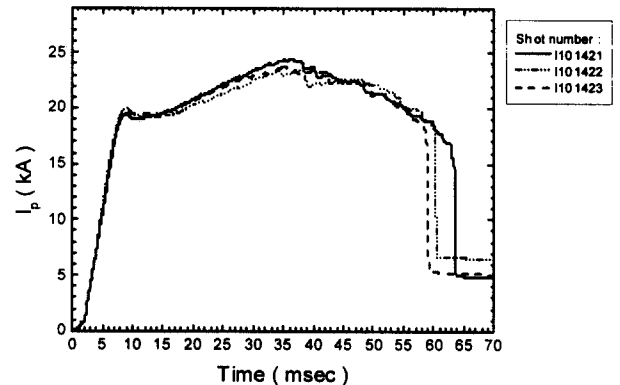


그림 9. 연속적으로 플라즈마를 방전하였을 때 유도된 플라즈마 전류.

할 필요성이 있다는 것을 의미한다. 이러한 일련의 테스트로, KAIST-TOKAMAK의 자동화 운영 시스템은 각 전원시스템에서 코일에 흐르는 전류는 동일하게 잘 재현된다는 것을 알 수 있었으며, 성공적으로 시스템이 동작한다는 것을 확인

할 수 있었다. 현재 이 시스템은 실험시 유용하게 이용되고 있다.

### V. 결 론

시간지연 발생기(SN100)와 제어회로를 사용하여 KAIST-TOKAMAK에서 전원시스템의 제어, 진단계로부터 자료수집까지 전 과정을 자동화 하는 운영시스템을 개발하였다. 이 운영시스템은 자동 및 수동모드로 선택이 가능할 뿐만아니라, 자동모드로 운전되고 있는 도중이라도 필요에 따라 운전자가 바로 수동모드로 전환할 수 있도록 융통성 있게 설계되었다. 이것은 운전도중 혹시 생길 수도 있는 어느 시스템의 기능불량 상태에 운전자가 빨리 대처하기 위한 것이다. 또한 고전압이 이용되는 토로이달자기장 전원시스템 중 TF C<sub>0</sub>의 전압과 TF C<sub>2</sub>의 전압 중 하나만 올라가는 위험상황에 맞는 경보장치를 개발하였다.

이 운영시스템을 이용하여 전원시스템으로 이용되고 있는 여러 축전기뱅크를 자동으로 충·방전하여 각 코일의 전류를 거의 동일하게 재현할 수 있었으며, 이에 따라 재현성이 있는 플라즈마 방전을 얻을 수 있었다. 이로 인해 방전시간간격을 줄일 수 있으며, 각 코일에 흐르는 전류의 제어로 사전에 프로그램된 플라즈마 방전모드 별 실험이 가능하게 되었다.

개발된 KAIST-TOKAMAK 자동화 운영시스템의 장점을 요약하면 다음과 같다. 첫째, 한 사람에 의한 토카막 운전이 가능함에 따른 집중도 및 연구효율의 향상, 둘째, 각 코일 전류의 재현성 향상, 셋째, 간단하고 저렴한 회로로 구성, 넷째, 광섬유를 이용한 고전력 제어로 외부노이즈 입력의 감소 및 접지루프의 방지, 다섯째, 각 코일 전류의 제어로 프로그램된 플라즈마 방전의 가능 등이다.

플라즈마 방전의 자동화 운영에 따라 적은 노력 및 시간으로 토카막 운전이 가능해졌고, 이에 따라 플라즈마 진단 및 플라즈마 특성 연구에 더욱 집중할 수 있어 연구효율이 향상되었다.

### 감사의 글

본 연구는 기초과학지원연구소 KSTAR 과제의 지원에 의해 수행되었습니다.

### 참 고 문 헌

- [1] J. G. Yang, J. W. Choi, H. Y. Chang and D. I. Choi, *Korean Applied Physics* **5**, 464 (1992).
- [2] J. G. Yang, J. H. Choi, J. W. Choi, S. H. Huh, S. H. Seo, G. C. Kwon, H. Y. Chang and D. I. Choi, *Korean Applied Physics* **6**, 407 (1993).
- [3] J. G. Yang, J. W. Choi, J. H. Choi, H. Y. Chang and D. I. Choi, *Rev. Sci. Instrum.* **64**, 3006 (1993).
- [4] 양장규, "KAIST 토카막에서의 플라즈마에 관한 연구," 박사학위논문, 한국과학기술원 (1994).
- [5] 권기청, "KAIST-TOKAMAK의 성능 향상과 플라즈마 위치 측정에 관한 연구," 박사학위논문, 한국과학기술원 (2000).
- [6] R. Morrison, *Grounding and Shielding Techniques in Instrumentation* (John Wiley & Sons, 1977).
- [7] 권기청, 최원호, 장홍영, 최덕인, *한국물리학회*, **16**, 1, 151(1998).
- [8] S.-H. Seo, W. Choe, H. Y. Chang and S.-H. Jeong, *Fusion Technol.* **37**, 89 (2000).
- [9] 권기청, 김재현, 김정희, 이효석, 전상진, 허승희, 최원호, 장홍영, 최덕인, "전자오븐을 이용한 간편하고 연속적인 마이크로파 발생장치 제작" *한국진공학회지* 특집호 게재승인 (2000).
- [10] Data sheet, "Optoelectronics Device Data," Motorola Inc (1993).
- [11] P. Horowitz and W. Hill, *The Art of Electronics* (Cambridge University Press, 1989).

## Development of a KAIST-TOKAMAK Discharge Automation System

Gi-Chung KWON, Jayhyun KIM, Chang-Rae SUN, Sang-Jean JEON, Songwhe HUH, S. Y. MOON,  
T. S. LEE, W. CHOE, H. Y. CHANG and D. I. CHOI

*Department of Physics, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Taejon 305-701*

(Received 6 April 2000)

A discharge automation system, consisting of a 32-channel delay generator and a personal computer, was developed on the KAIST-TOKAMAK not only for generating reproducible plasmas but also for increasing the efficiency of experimental activities. It controls a number of tokamak subsystems, such as the coil power system, by automatic charging/discharging of various capacitor banks, as well as the acquisition of experimental data obtained from various diagnostics. With the help of this newly developed automation system, the whole KAIST-TOKAMAK can be operated by a single operator, which has led to effort- and time-efficient tokamak experiments.