

싸이라트론의 진단 및 자동 조절 장치 개발

\*김성희, 박성수, 한영진, 김성철, 남상훈  
포항공대 가속기연구소

A development of auto-ranging and diagnostic method of thyratron

S.H.Kim\*, S.S.Park, Y.J.Han, S.C.Kim, S.H.Nam

Pohang Accelerator Laboratory Pohang University of Science and Technology (POSTECH)

**Abstract** - The thyratron is a very important device in the modulator as the high power switch but there is no method to diagnose the inside of the thyratron. The thyratron always require ranging, maintaining of the proper pressure, for the optimum operation of the thyratron. But, up to now this only depends on the experience of the operator. In this paper, we discuss the diagnostic of the thyratron by the convection heat current and the principle and experimental data will be compared for the automatical adjustment of optimum gas pressure of the thyratron at the intial stage.

온도에 의해 영향을 받으나 대류열은 기체밀도에 의해 좌우된다. 또한 대류열은 기체의 온도와 구조변화에도 연관되므로 기체밀도와 가동상태 등을 종합적으로 나타낼 수 있는데 대류열의 변화는 히터전원의 전류값의 변화로 나타난다. 즉 독립적으로 설치된 히터전원이 레저버전원에 따라 영향을 받는다. 이러한 특성을 이용하면 다음과 같이 싸이라트론을 진단할 수 있다. 1) 레저버의 전류변화에 따른 수소의 흡수 및 배출량을 히터전류로 분석함으로써 수소 기체의 량을 진단한다. 2) 히터전류의 이상변동을 알 수 있어 싸이라트론의 구조변형, 냉각 장치의 이상, 양극(anode)의 파열 등을 사전에 감지한다. 3) 수소기체의 소진 및 레저버의 기능을 진단할 수 있어 싸이라트론의 교체여부를 정확히 판단할 수 있다.

1. 서 론

싸이라트론(thyratron)은 레이더, 가속기, 펄스레이저 등에 사용되는 고출력 스위치로서 펄스파워에서 가장 핵심적인 부품이나 내부를 진단할 수 있는 방법이 거의 없다. 현재의 싸이라트론은 스위칭(switching)의 매체로서 수소 또는 중수소를 사용하는데 작동조건에 따라 적절한 기체 압력을 유지하여야 스위칭을 할 수 있다. 이때 적정압력이 되도록 레저버(reservoir)에 저장된 수소 기체를 열에너지를 이용하여 방출하는데 이 과정을 레인징(ranging)이라고 한다. 레인징은 싸이라트론의 내부상황을 전혀 알 수 없는 상태에서 실시하므로 숙련자가 경험적인 감각으로 스위칭 소리를 듣고 레저버의 출력을 조절하고 있는 실정이다. 이 작업이 아직도 감각적으로 수행되고 있는 원인은 싸이라트론의 내부를 진단할 수 있는 요소를 발견하지 못했기 때문이다. 또한 수소 기체는 장시간 사용함에 따라 싸이라트론의 구조물에 흡수되거나 화학반응을 일으켜 소진된다. 이때 싸이라트론을 교체해야 하는데 수소 기체가 실제로 소진되었는지를 진단할 수 없다.

싸이라트론의 내부는 여러 가지 요인이 서로 복잡하게 연계되어 있으나 스위칭의 매체가 기체 프라즈마이므로 내부 기체의 압력과 순도가 변화함에 따라 방전특성이 현저히 달라진다. 따라서 제조사는 다르지만 모든 싸이라트론이 공통적으로 갖고 있는 구조에서 진단이 가능하고 나아가 자동으로 기체 압력을 조절할 수 있는 근거가 되는 요소가 필요하다. 이러한 목적에 의해 싸이라트론의 진단요소로 발견된 것이 레저버 전압에 따른 히터(heater)전류의 변화이다.

싸이라트론은 음극에서 열전자를 방출시키기 위한 히터전원과 수소기체의 밀도를 조절하는 레저버 전원이 독립적으로 있다. 싸이라트론은 고전압을 스위칭하기 위하여 사전에 이온화시킨다. 사전이온화 방법으로 음극에 열을 가하여 열전자를 방출시켜 일정한 전압을 가하면 이온화상태를 유지하게 된다. 이때 음극에 열을 가하는 방법이 전열선에 일정한 전력을 인가하는데 전열선에 가해진 전기에너지는 복사열, 대류열, 전도열로 바뀐다. 이 중에서 복사열과 전도열은 장치의 구조와 전열선의

2. 본 론

2.1 싸이라트론의 진단 및 자동조정에 대한 원리

그림 1은 싸이라트론의 구조를 나타낸 것이다. 히터전원에서 전열선에 전력을 공급하면 음극에서 열전자가 방출되어 레저버에서 조정되는 수소 기체를 이온화시킨다. 이온화된 전자는 콘트롤 그리드(control grid)의 트리거 펄스(trigger pulse)에 의해 양극으로 이동하여 스위칭 작용을 한다. 이러한 싸이라트론의 구조에서 히터의 전열선과 레저버에서 조절되는 수소의 밀도에 의해 대류에 의한 열전달이 생긴다.

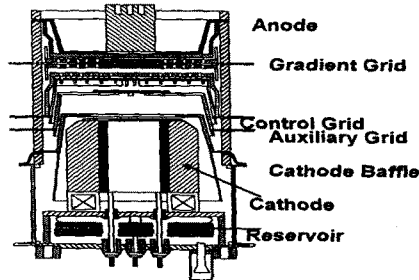


그림 1. F-303 싸이라트론의 구조.

실린더의 구조에 전열선이 있을 때  $T_w$ 을 전열선의 온도,  $T_s$ 를 구조물의 온도,  $T_i$ 를 전열선에 입사되는 기체의 온도,  $T_r$ 이 전열선에서 반사되는 기체의 온도라고 하면 전열선에서 기체에 의해 전달되는 단위 면적당 에너지의 비율  $E$ 는 다음과 같이 표현된다<sup>(1)</sup>.

$$E = 0.011 \frac{\gamma + 1}{\gamma - 1} \sqrt{\frac{273}{T_s M}} \alpha P (T_w - T_r)$$

여기서  $\gamma$ 는 기체의 비열비,  $M$ 은 기체의 분자량,  $\alpha$ 는 적응계수(accommodation coefficient),  $P$ 는 mbar로 표현된 기체의 압력이고  $E$ 는  $W \cdot cm^{-2}$ 의 단위로 표현되었다. 위에서 언급한 바와 같이 히터에 가해진 전기에너지

지는 복사열과 대류에 의한 열, 그리고 전도에 의한 열로 소비된다. 전열선의 단위 면적 당 복사열의 전이는 다음과 같이 표현된다.

$$Q = \sigma \beta (T_w^4 - T^4)$$

여기서,  $\sigma$ 는 스테판 상수(Stefan's constant)이며  $\beta$ 는 방출률(emissivity)이다. 온도  $T_1$ 과  $T_2$ 사이의 단면적  $a$ 가 일정하고 길이가  $l$ 인 고체에 의한 열전도는 다음과 같이 표현된다.

$$C = \frac{a}{l} \int_{T_1}^{T_2} \Lambda(T) dT$$

여기서  $\Lambda(T)$ 는 온도에 의존하는 고체의 열전도율이다. 따라서 전열선에 입력되는 전력  $\Gamma$ 는 다음 식으로 표현한다.

$$\Gamma = QS + ES + C$$

여기서  $S$ 는 전열선의 표면적을 나타낸다.

만약에 전열선의 전압  $V_0$ 를 일정하게 유지하면 위의 같이 두 가지 경우를 고려할 수 있다. 첫번째, 대류열을 무시할 수 있는 매우 낮은 압력에서 의하여 전열선의 전력과 둘째로 압력  $P$  mbar에서 전열선의 전력은 다음과 같이 표현된다.

$$V_0 I_1 = Q_1 S + C_1, \quad V_0 I_2 = Q_2 S + ES + C_2$$

여기서  $I_1$ 은 매우 낮은 압력에서 전열선에 흐르는 전류이고  $I_2$ 는 압력  $P$  mbar에서 전열선에 흐르는 전류이다. 기체 압력이 증가하면 전열선의 온도가 감소되면서 저항이 낮아진다. 이때 전열선의 전압을 고정하면 전열선의 온도를 일정하게 유지하기 위해서 더 많은 전류가 전열선에 흐르게 된다. 위의 두식을 정리하면

$$V_0 (I_2 - I_1) \equiv V_0 I_e \approx K_E (T_w - T_s) P$$

가 되어 대류 열에 의해 더 흘러야 할 전류  $I_e$ 는 압력에 비례하여  $P \propto I_e$  와 같이 표현된다. 전열선에 인가되는 전압이 일정하면 전열선의 저항은 전류에 반비례하므로 전열선의 저항은 압력에 반비례한다. 더욱이 대류 열에 의해 더 흘러야 할 전류  $I_e$ 는 전열선의 총 전류  $I_w$ 의 합수이므로 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$I_w \approx BP, \quad R_w \approx \frac{D}{P}$$

여기서  $B, D$ 는 상수이다.

## 2.2 싸이랏론의 특성조사

위식을 검증하기 위하여 압력 변화에 의한 히터 전류의 변화를 조사하였다. 싸이랏론의 배기 튜브를 잘라서 밴트(vent)한 후 연결 튜브(quick-disconnect adapter)를 통하여 압력 게이지와 펌프를 설치한 후 싸이랏론을 재 배기하였다  $5 \times 10^{-4}$  mbar의 압력에서 밸브(valve)를 닫고 레저버의 전압을 2 V에서 6 V까지 변화시키면서 기체의 압력을 조사하였다. 그림 2는 레저버의 전류, 전압과 기체의 압력에 대한 관계를 나타낸 것이다. 전류, 전압과 기체의 압력은 log-log 그래프에서 선형적이다. 그림 3은 기체의 압력에 의하여 변하는 히터 전류를 조사한 것이다. 기체의 압력에 비례하여 히터 전류가 선형적으로 변한다. 포항 가속기 연구소의 전력 변조기에 사용하고 있는 싸이랏론에 대해 레저버 전압과 히터전류의 관계를 조사했다. 그림 4은 싸이랏론의 히터전압을 6.3 V로 고정시키고 레저버전압을 0 - 6 V로 변화시킬 때의 히터전류를 나타낸 것이다. 레저버의 전압에 비례하여 히터전류가 변함을 알 수 있었다. 레저버의 설정 전압이 3.3 V일 때 히터 전류는 61 A로 측정되었지만 오랜 기간을 사용하면 내부 기체가 소모되어 히터 전류는 61 A이하로 될 것이다. 이때 히터 전류가 61 A를 회복하도록 레저버 전압을 3.3 V이

상으로 올려 주어야 한다. 이것이 싸이랏론의 기체 압력을 조절하는 새로운 레인징 방법이다. 레저버의 수소 기체가 소진되면 레저버 전압의 조정으로 히터 전류를 더 이상 변화시킬 수 없게되는데 이때 싸이랏론을 교체하여야 한다. 그림 5는 동일 싸이랏론에서 가동 시간이 3,400 시간(98년 5월에 측정)일 때와 13,316 시간(99년 11월에 측정)에서 레저버의 전압에 따른 히터 전류를 측정 한 것이다. 약 10,000 시간이 지난 후에 히터 전류가 감소되고 있어 내부의 기체가 소모되고 있음을 알 수 있고 98년 레저버 전압 3.3 V(히터 전류 61 A)에서 99년 11월, 레저버 전압 4 V(히터 전류 61 A)로 조정하였다.

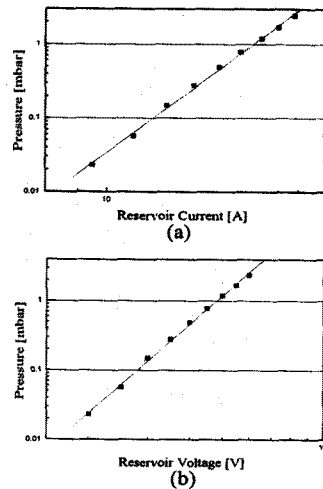


그림 2 레저버 전압, 전류의 변화에 따른 싸이랏론의 내부압력변화.

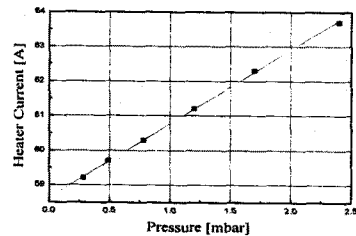


그림 3 레저버 전력에 의해 싸이랏론의 내부압력이 변화할 때 히터전류의 변화.

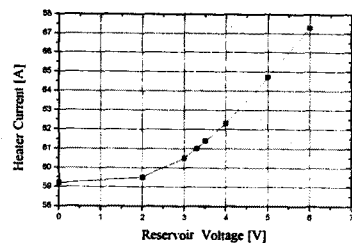


그림 4 레저버 전압을 변화시킬 때 히터 전류의 변화.

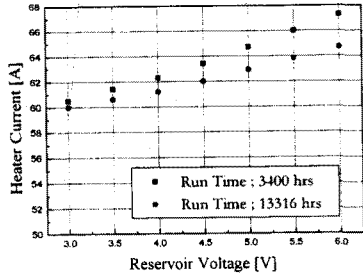


그림 5 운전 시간에 따라 레이저 전압을 변화시킬 때 히터 전류의 변화.

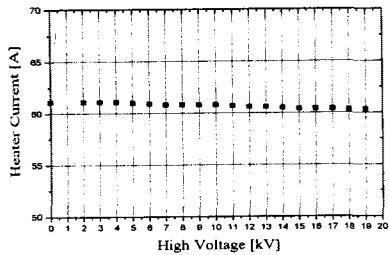


그림 6 전력 변조기에 설치된 싸이라트론에서 고전압을 변화시킬 때 히터 전류의 변화.

그림 6은 히터전압을 6.3 V, 레이저 전압을 3.3 V로 고정하고 전력변조기의 고전압을 변화시켰을 때의 히터 전류의 변화를 조사한 것이다. 전압이 높을수록 히터 전류가 다소 낮게 나타나는데 이것은 고전압일수록 고출력을 스위칭하기 때문에 내부의 기체 온도가 상승된다. 따라서  $T_i$  ( $\sim T_s$ )의 값이 크므로 대류에 의한 히터의 열 손실이 적어 히터전류가 낮게 측정된다. 특성실험으로 진단 및 자동조절의 원리에서 언급한 이론들을 실제 싸이라트론에 적용할 수 있음을 확인하였다.

### 2.3. 진단 및 자동조절의 장치

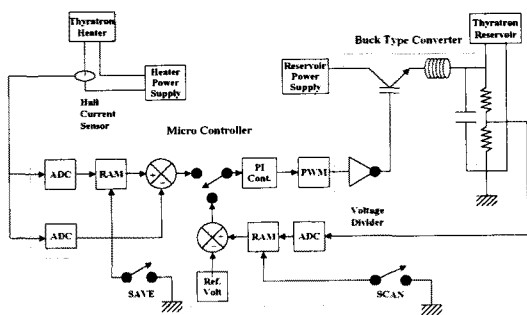


그림 7 싸이라트론의 진단 및 자동조절 장치의 회로도

그림 7은 싸이라트론을 진단하고 수소밀도를 자동 조절할 수 있는 회로도이다. 수소밀도의 자동조절은 히터 쪽의 최적전류를 설정한 다음 전류제어장치의 기억버튼을 누르면 프로세서(processor)는 이때 설정된 전류 값을 기억하고 있게 되며 기억된 전류 값을 전압지령으로 변환하여 레이저의 전압을 제어하게 된다. 기체밀도가

낮아져 현재 흐르는 전류 값이 작아지면 기억된 전류 값이 될 때까지 레이저의 전압을 증가시켜 일정한 전류가 되도록 제어되는데 이것이 처음 설정된 수소압력을 계속 유지시키는 작용이다. 싸이라트론은 전력변조기의 가동 조건에 따라 기체밀도의 설정이 달라져야 하므로 수동과 자동모드로 되어있다. 싸이라트론의 진단은 초기에 히터의 최적전류와 연관된 레이저의 최적전압을 기억시키고 이 전압에서 설정된 한계 값 이상 또는 이하의 변동이 있으면 경고신호를 발신하도록 한다. 이 신호에 의해 스캔 버튼을 누르면 레이저의 전압이 0V에서 최대전압까지 일정한 시간과 간격으로 변할 때의 히터전류가 측정되어서 이전의 자료와 비교하여 싸이라트론의 상태를 진단하도록 되어 있다. 이 장치에 의하여 레이저의 전압이 0 V에서 6 V까지 15분의 간격으로 0.5 V씩 변할 때의 히터 전류의 값이 컴퓨터에 입력되어 그래프로 나타낸 것이 그림 8이다. 진단에 사용된 싸이라트론은 진단 방법이 없을 때 경험적으로 내부 수소 기체가 소진된 것으로 간주하여 교체한 것이다. 그림 8에서 A는 운전시간이 31,300 시간이고 B는 29,168 시간동안 운전하였다. 그리고 C의 운전시간은 33,788 시간이다. 그러나 이 싸이라트론을 진단한 결과, 그림 8과 같이 내부의 수소 기체는 풍부하여 충분히 사용할 수 있는 것으로 판정되었다.

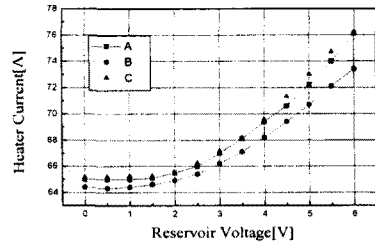


그림 8. 교체된 싸이라트론의 레이저 전압에 따른 히터 전류의 변화량.

### 3. 결 론

지금까지 진단 방법이 없었던 싸이라트론의 진단 요소를 발견하여 그 진단요소에 대한 이론적 타당성을 입증하였고 싸이라트론에 적용할 수 있는 방법에 대하여 연구하였다. 대류열에 의해 싸이라트론의 히터 전류는 내부 기체의 압력에 비례하여 변하고 이 원리에 의해 싸이라트론의 자동 조절과 진단이 가능하다. 이 진단 요소를 싸이라트론에 적용한 결과, 이론에서 예측한 대로 히터 전류는 싸이라트론의 내부 기체의 압력에 비례하였다. 이 진단 요소에 의하여 싸이라트론을 자동으로 조절하고 진단할 수 있는 장치를 고안하고 제작하여 내부 기체가 소진된 것으로 판단하였던 싸이라트론을 진단하였다. 향후 이 장치를 전력 변조기에 설치하여 자동 조절의 실험을 계속할 계획이다.

### (참 고 문 헌)

- [1] J. H. Leck, *Total and Partial Pressure measurement in Vacuum Systems*, Blackie, Glasgow and London, 1989, pp39-67.
- [2] A. Roth, *Vacuum Technology*, 2<sup>nd</sup> ed. Elsevier Science Publishers B. V., 1982, pp37-38