

# KSTAR 제1벽 세정을 위한 방전세정 시스템 설계

정승호 · 인상렬

한국원자력연구원 핵융합공학기술개발센터, 대전 305-353

(2007년 8월 20일 받음)

본 논문에서는 KSTAR 토카막 진공용기의 세정을 위한 방전세정 시스템의 설계에 대해 기술하였다. 먼저 방전세정효율에 영향을 주는 매개변수들에 대해 논의하였으며, 실제 설계에서 직류방전 보다 낮은 압력에서 방전이 시작되고 유지되며 따라서 세정효율이 높은 RG 방전(RF-assisted DC glow discharge) 방법을 채택하였다. 그리고 방전세정의 균일성을 위해 두 개의 방전 전극을 진공용기의 진단포트(A,I-port)에 설치하였다. 설계된 방전세정 시스템은 KSTAR 진공용기 내벽 세정뿐만 아니라 제1벽의 연료재순환(fuel recycling)이나 보론화 처리(boronization)등의 연구에도 응용될 수 있다.

주제어 : 대형 진공용기, 방전세정, RG(RF assisted glow)방전

## I. 서 론

KSTAR 장치는 2007년 8월 건설단계가 종료되고 토카막 조립이 완료되면 2008년 이내에 First plasma를 목표로 시운전에 들어가게 된다. 이때 토카막 플라즈마를 원활히 발생시키는데 진공용기 내벽의 상태가 중요한 요인이 된다. 비록 진공용기가 초고진공 세정(UHV cleaning)을 거쳤다 하더라도 수십 원자 층의 탄소화합물 혹은 산소화합물들이 진공용기 내벽을 덮고 있으며 플라즈마 발생 시 이들로부터 방출되는 가스분자 또는 원자들은 플라즈마에 의해 해리되고 이온화되어 결국 불순물(Low-Z impurity)의 원천이 된다 [1,2,3]. 이러한 불순물들이 토카막 플라즈마의 온도나 감금특성에 좋지 않은 쪽으로 지대한 영향을 준다는 사실은 이미 잘 알려져 있다 [4]. 따라서 토카막 플라즈마 발생실험 이전에 적절한 방법으로 이런 불순물을 제거하는 것이 꼭 필요한 과정이며 이를 위해 가열 탈리(baking), 방전세정(discharge cleaning)등이 널리 사용되어 왔다 [5,6,7].

토카막 진공용기의 효율적인 방전세정 방법을 찾기 위해 불순물들이 토카막 방전동안 어떻게 행동하는지 다시 한번 살펴볼 필요가 있다. 일반적으로 불순물 원자나 분자들은 플라즈마 이온의 에너지가 낮은 토카막 방전 초기부터 발생하며 이들은 토카막 진공 시스템에 의해 바로 배기되지 않고 높은 온도의 토카막 플라즈마에 의해 다시 해리(dissociation)되고 이온화(ionization)되며 일부는 재결합(recombination) 과정을 거치며 radiation을 방출하여 플라즈마를 냉각시키고 다른 일부는 자기장을 따라 또 다시

진공용기 벽에 재부착하는 과정을 반복한다. 결국 효율적인 세정을 위해서는 많은 양의 불순물을 진공용기 벽으로부터 떼어내는 것도 중요하지만 일단 원자나 분자 상태로 벽으로부터 나온 불순물들을 다시 이온화 시키지 않고 오랫동안 가스 상태를 유지시켜 배기시스템에 의해 배기될 확률을 높이는 것이 중요한 요인이 된다. 따라서 방전세정에 사용하는 플라즈마는 그 온도가 불순물들의 이온화 에너지에 비해 낮은 것이 유리하다. 한편 온도가 낮은 플라즈마의 경우 이온의 에너지가 작기 때문에 벽으로부터 불순물을 떼어내는 과정은 물리적인 스퍼터링(sputtering)에 의존하기 보다는 라디칼(radical)들의 화학적인 결합에 의해 탄소나 산소 불순물을 휘발성 화합물로 변화시켜 제거하는 것이 훨씬 유리하다[5]. 따라서 방전세정 가스도 헬륨이나 아르곤 같은 불활성기체 보다 수소를 사용하는 것이 특히 토카막 운전 개시 전 토카막 용기의 방전세정에 유리하다고 볼 수 있다. 본 논문에서는 위에서 논의한 두 가지 개념을 기본으로 KSTAR 토카막 용기의 방전세정에 적합한 방전시스템을 설계하였다.

## II. 방전세정 매개변수

방전세정 과정은 방전을 직접 일으키는데 필요한 전극 및 전원 뿐 만 아니라 연료 주입계(gas feeding system) 및 진공 배기계 (pumping system)와도 밀접한 관계가 있다. 효과적인 세정을 위한 조건 중의 하나로 진공용기의 실

\* [전자우편] shjeong2@kaeri.re.kr

효면적( $A_{eff}$ , effective area)에 대한 배기속도( $S_p$ , pumping speed)의 비율을 들 수 있다. 실험적으로 유효면적에 대한 배기속도 값이 0.1m/s 값을 유지하는 것이 바람직하다는 결과가 알려져 있다 [8]. 여기서 실효면적이란 방전세정 시 플라즈마가 직접 닿는 면적을 나타내며 KSTAR 진공용기의 경우 약 80m<sup>2</sup>이다. 한편 KSTAR 진공 배기계에 장착된 8개 TMP의 유효 배기속도(effective pumping speed)가 진공용기에서 대략 15,000 l/s임을 고려할 때 방전세정 시 TMP를 4~5대 가동함으로써 위에서 언급한 비율에 도달할 수 있다.

두 번째 방전세정 효과에 영향을 미칠 수 있는 인자로 용기 벽 표면의 온도( $T_w$ )를 들 수 있다. 방전세정 시 불순물 분자와 방전가스 라디칼(Hydrogen radical)과의 화학반응은 온도에 따라 증가하므로 용기 벽의 온도를 200°C 이상 유지하면 방전세정 효율을 크게 올릴 수 있지만 이 문제는 KSTAR의 가열 탈리(baking) 능력에 좌우된다.

방전세정 효과를 키우기 위해 방전 전류 밀도( $J_{GD}$ , discharge current density)를 높일 수 록 유리 하지만 전류 밀도가 커질 수 록 아크(arc) 발생 확률도 증가한다. 글로우 방전(glow discharge)의 적절한 전류 밀도는 10~25  $\mu A/cm^2$  으로 알려져 있다. KSTAR 용기 내벽의 면적을 고려할 때 대략 10 A 정도의 방전 전류가 흐르는 것이 이상적이다. 방전 유지 전압이 500 V 이하라 가정하면 방전 전력은 5kW이고 방전 세정의 균일성을 고려해 2개의 방전 시스템을 진공용기에 장착할 경우 개당 2.5kW 정도의 DC 전원이 필요하다.

마지막으로 세정 효율에 영향을 주는 것은 방전 유지 압력( $P_{DC}$ )이다. 방전 압력은 기본적으로 방전 기작(mechanism)에 의해 결정되며 방전 시작 압력(ignition pressure)과 방전 종료 압력(quenching pressure)은 방전 형태에 따라 각기 다른 값과 폭을 갖는다. 방전세정은 방전 압력이 낮을수록 세정효율이 높기 때문에 압력이 낮아도 안정적인 방전을 유지할 수 있는 방전 방법을 선택하는 것이 중요하다. 만약 방전 압력을  $5 \times 10^{-3}$  mbar 정도로 유지할 수 있다면 방전에 필요한 가스의 유량( $Q_{IN}$ , mass flow rate)은 40 mbar l/s이고 이는 대략 2,500 sccm에 해당된다. 방전 개시압력이 방전 유지 압력보다 1차수 정도 높을 수 있는 점을 감안하여 방전세정용 mass flow controller를 20,000 sccm 급으로 준비하였다. 표 1에 이상 논의한 방전세정 효율에 영향을 주는 매개변수들에 대해 정리하였다.

표 1. 방전세정 효율에 영향을 주는 매개변수

$S_p/A_{eff}$	0.1m/s	KSTAR $A_{eff}$ : 80m <sup>2</sup> $S_p$ 요구치 : 8,000 l/s
$T_w$	$\geq 130^\circ C$	KSTAR baking Temp.
$J_{GD}$	10~25 $\mu A/cm^2$	$I_{GD}$ : 8A~20A
$P_{DC}$	$5 \times 10^{-3}$ mbar	$S_p$ : 8,000 l/s 기준 $Q_{IN}$ : 40 mbar l/s

### III. 방전세정 시스템

방전세정 시스템의 상세한 설계에 들어가기 전에 우선 해야 할 일은 어떠한 형태의 방전을 이용할 것인지 결정하는 일이다. 이제까지 토카막 진공용기의 세정을 위해 사용되어온 방전은 주로 DC 방전과 RG(RF assisted glow)방전이며[5,7,8] 최근에 ICRF 안테나를 이용한 RF 방전등이 논의되고 있다 [9]. RF 방전세정은 ICRF 가열 시스템이 갖춰진 토카막에서 기왕에 장착된 ICRF 안테나를 이용해 방전세정을 하는 방법으로 방전을 위한 새로운 전극을 마련할 필요가 없어 별도의 준비가 없는 대신 플라즈마 온도가 높아 불순물의 재 이온화(re-ionization) 확률이 높아 세정 효율이 낮을 우려가 있으며 아직 그 효과가 입증되지 않았고 몇몇 토카막에서 시도해 보고 있는 실정이다. 특히 KSTAR 진공용기는 아직 토카막 플라즈마를 발생시키기 전이므로 용기 내벽에 많은 불순물들이 달라붙어 있는 상태로 볼 수 있으며 강력한 방전세정 시스템이 필요하다고 하겠다. DC 방전 세정은 상당히 많은 토카막에서 채택하고 있는 방전시스템이지만 방전 시작 압력 뿐 만 아니라 방전 유지 압력도 높아 불순물 배기 효율이 떨어지며 방전세정 과정이 장시간 필요한 경우 배기 시스템에 부담을 줄 수 있다. 다만 KSTAR 토카막처럼 비교적 큰 토러스에서도 Paschen law에 따라 방전 개시 압력이 낮아질 수 있는지는 아직 확인되지 않았다. 이점은 시스템이 완성되면 꼭 확인해야 할 논점 중 하나이다. RG 방전은 1980대 초 개발된 후 많은 중형 토카막에서 채택되었다. RG 방전은 진공용기를 음극(cathode) 그리고 방전전극을 양극(anode)으로 사용한다는 점에서 DC 방전과 기본적으로 같지만 고주파방전을 통한 플라즈마 발생에 필요한 RF antenna가 동시에 DC 방전의 양극(anode) 역할을 한다는 점에서 다르다. 사진1.의 (右)에서 전극 주변의 밝은 부분이 RF에 의해 생성된 플라즈마이며 virtual anode 역할을 한다. 주위의 희미

하게 빛나는 것이 DC 바이어스에 의한 방전 플라즈마 이다. 이 경우 RF 방전이 보다 낮은 압력에서 시작될 수 있으므로 방전 시작 압력이 낮을 뿐 아니라 방전 유지 압력도 DC 방전에 비해 훨씬 낮다. 하지만 RF power를 전송해야 하는 번거로움이 남는다. 본 설계에서는 가장 신뢰할 수 있는 방법인 RG 방전을 채택하였다.

RG 방전세정 시스템은 기본적으로 RF 방전전극, RF 전원과 DC 전원으로 구성된다. RF 방전전극은 다시 RF antenna 부분과 냉각선로를 접하는 RF 전송선 그리고 RF antenna를 진공용기의 중앙부로 이송할 구동부로 구성된다. RF 안테나는 RF power에 의해 RF 플라즈마를 안테나 주변에 발생시켜 anode 역할을 하는 부분으로 가능한 한 낮은 압력에서 방전을 시작할 수 있고 또 유지할 수 있는 형태로 설계 되어야 한다. 유도형(inductive) RF 방전은 RF induction에 의해 유지되지만 방전 개시만큼은 안테나 양단의 RF 전압 차에 의해 시작된다. 따라서 같은 인덕턴스(inductance)를 갖는 안테나 일 경우 코일의 직경이 큰 경우보다 코일의 길이가 긴 경우가 방전개시에 유리하다. 안테나의 인덕턴스는 클수록 방전 유지가 쉽지만 임피던스 정합이 어려울 수 있으므로 적절한 선택이 필요하다. KSTAR RF 안테나는 직경 8 cm 길이 12 cm 감김 수 10회의 코일 형으로 설계하였다. 재료로는 1/4" 무산소동 튜브(OPHC tube)를 사용하였으며 RF feedthrough를 통해 전송선과 연결된다. 또한 RF 플라즈마 자체에 의한 스퍼터링(sputtering)을 줄이기 위해 니켈로 도금 처리하였다 [10]. 안테나 인덕턴스의 설계치는 3.3 $\mu$ H이다.

KSTAR의 경우 cryostat 때문에 상전도 코일 토카막들에 비해 긴 진단 port를 갖으며 따라서 RF 전극도 긴 전송선로가 필요하다. KSTAR에서 방전세정용 전송선로는 임피던스 정합기(impedance matching box)로부터 RF 안테

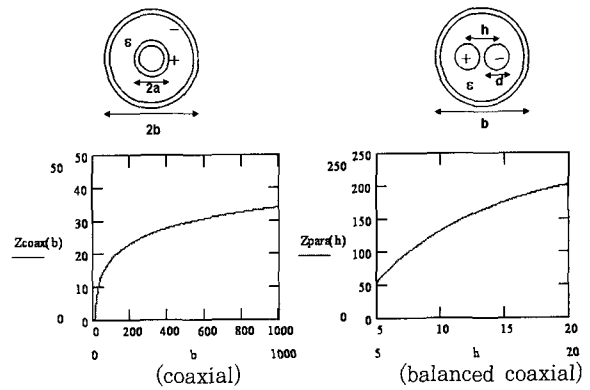


그림 1. 전송선로 구조와 특성 임피던스

나까지를 의미하며 진공 port에 위치한다. 그리고 안테나 냉각을 위한 냉각선로 역할도 하면서 사용하는 RF에 대해 적절한 임피던스를 갖게 설계되어야 한다.

전송선로를 설계하기 위해 두 가지 전송선로 모델을 고려하였다. 첫 번째 모델인 coaxial line은 냉각수가 중심 튜브를 통해 들어가 바깥쪽 관으로 나오는 구조로 구조가 간단하지만 물의 유전율이 높아 고려할 만한 크기 범위에서 임피던스 값이 낮았다. 전송선로의 낮은 임피던스는 높은 전류 값을 의미하며 결국 원하는 부하(load) 보다는 전송선로 자체에서의 전력 손실(power loss)을 의미한다. 두 번째로 고려한 balanced coaxial line은 원통 관 내부에 두 가닥의 튜브가 들어있는 형태로 한 튜브로 들어간 냉각수가 안테나를 지나 다른 튜브로 되돌아 나오는 구조이다. 이 모델로 coaxial line의 경우보다 10배정도 낮은 전류를 얻었으며 500 W RF power를 기준으로 전송선로의 최대 전압은 5kV 이하로 설계하는데 무리가 없었다. 설계된 전송선로의 내경은 70 mm, 내부 튜브의 외경은 6.35mm 그리고 두 튜브 사이의 거리는 19.5 mm이다. 그림 1은 전송선로 단면의 dimension에 따른 임피던스 계산 값을 보인 것이다.

이 전송선은 용접 벨로우즈에 의해 진공과 차단되어 있으며 port flange 바깥쪽 ball screw와 연결되어 air motor에 의해 구동된다. RF 안테나는 평소엔 진공용기 표면보다 바깥쪽 진단포트 내에 위치해 있다가 방전세정 때에는 진단포트 아래에 설치된 레일을 따라 내부 중심까지 전송선로와 함께 이송되며 최대 이송거리는 1 m 이다.

RF 전원은 RF 발생장치(RF generator)와 임피던스 정합기(matching box)로 구성되며 임피던스 정합기는 정합을 쉽게 하기 위해 RF 전극 가까이에 위치해 있으며 RF 발생장치와는 동축선으로 연결되어 있다. 임피던스 정합은

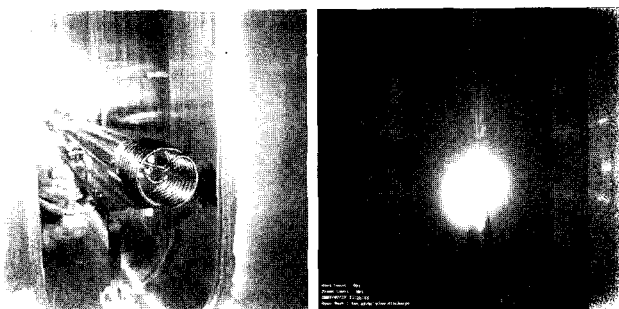


사진 1. KSTAR 진단포트 내부에 설치된 방전전극(左)과 RG 방전 중 port쪽에서 토카막 중심부를 보고 찍은 사진(右).

자동 정합 조절장치(auto matching controller)에 의해 원격으로 조절된다. RF 전원의 전력은 최대 600 W이고 주파수는 13.56 MHz 이다.

방전에서 바이어스(bias)를 걸어주는 DC 전원은 +단자가 RF의 한쪽 단자에 연결되어 anode 역할을 하게 되며 -단자는 진공용기 벽에 연결 되며 토카막 장치의 접지(ground)와 같은 전위(electrical potential)을 갖는다. RF 단자와 DC 전원 사이에는 DC전원으로 RF의 유입을 막기 위해 초크코일(chock coil)이 설치되어 있다. DC 전원의 전력은 6 kW이고 정격 최대전압 800 V, 정격전류 7.5 A이다.

#### IV. 요약

KSTAR 토카막 진공용기는 제작이 완료되고 몇 차례 진공배기를 통해 진공누설검사를 끝냈지만 충분한 가열 탈리 과정을 거치지 않아 용기 내벽에 많은 불순물을 포함하고 있는 상태이다. 원활한 토카막 플라즈마 발생을 위해 진공용기 내벽의 불순물을 제거하는 것이 필수불가결하며 이를 위해 방전세정 시스템을 설계하였다.

방전 방법으로는 DC 방전에 비해 방전 개시 압력이 낮고 방전 압력 영역이 상대적으로 넓어 방전유지가 낮은 압력에서도 가능한 그래서 방전세정 효율이 높은 RG(RF assisted glow) 방전 방법을 채택하였다.

균일한 방전을 위해 방전 전극을 용기 단면의 중앙에 위치할 수 있게 movable 형태로 설계하였으며 토러스 형태인 진공용기의 서로 마주보고 있는 A, I-port[11]에 두 시스템이 설치되도록 하였다. 방전 전극은 작은 RF power에도 쉽게 방전을 일으킬 수 있도록 코일형 RF 안테나와 전송선로를 설계하였으며 방전 시 발생하는 열을 제거할 수 있도록 냉각관로를 겸하게 하였다.

전원은 하나의 전극 당 13.56 MHz 600 W RF 전원과 최대 800 V 6 kW DC 전원을 준비하였다. 그리고 가스 주입을 위해 20,000 sccm 가스 유량 조절기를 설치하였다.

본 논문에서 기술한 KSTAR 방전세정 시스템은 현재 제작, 설치 및 시운전이 완료된 상태에 있다 [12]. 앞으로 압력, DC 바이어스 전압, RF power, gas 종류 등에 따른 방전 특성 실험이 진행되어 KSTAR 진공용기에서 방전 최적 조건이 찾아지면 방전 세정 효율에 대한 보다 심도 높은 연구를 수행할 수 있을 것이다. 이때 RG 방전의 낮은 방전 압

력은 별도의 장치 없이 배기관(pumping duct)에 RGA를 설치 동작시킬 수 있게 하여 방전 세정 중에 불순물의 변화를 측정하는데 큰 장점으로 작용할 것이다.

마지막으로, KSTAR 방전세정 시스템은 진공용기 내벽 세정뿐만 아니라 제1벽의 연료재순환(fuel recycling)이나 보론화 처리(boronization)등의 연구에도 그대로 사용될 수 있어 지속적인 플라즈마-제1벽 상호작용(plasma-wall interaction) 연구에 큰 도움을 줄 수 있을 것이다.

#### 참고문헌

- [1] G. Betz, G.K. Wehner, L. Toth, A. Jochi, J. Appl. Phys. **45**, 5312 (1974).
- [2] K.J.Dietz, E. Geissler, F. Waelbroeck, J. Kirschner, E.A. Niekisch, K.G. Tschersich, G. Stöcklin, E. Vietzke, K. Vogelbruch, J. Nucl. Mat. **63**, 167 (1976).
- [3] J. Kirschner, K.J.Dietz, F. Waelbroeck, Proc. 9th. Symp. Fusion Techn., Garmisch Partenkirchen, Pergamon Press (1976) EUR 5602, 65.
- [4] G.M. McCracken, P.E. Stoot, Nucl. Fusion **19**, 889 (1979).
- [5] J. Winter, F. Waelbroeck, B. Brandt, K.J. Dietz, I. Ali-Khan, P. Wienhold, J. Nucl. Mat. **93 & 94**, 812 (1980).
- [6] Y. Sakamoto et al., J. Nucl. Mat. **111 & 112**, 485 (1982).
- [7] G.L. Jackson, R.E. Clausing, A.F. Lietzke, S. Ejima, L.C. Emerson, L. Heatherly, J. Vac. Sci. Technol. **A1(4)**, 1861 (1983).
- [8] F. Waelbroeck, J. Winter, I. Ali-Khan, P. Wienhold, B. Brandt, K.J. Dietz, JUL-1692 (1980).
- [9] A. Lysoivan et al., Final Report on ITER Design Task D350.2 (1998).
- [10] D. S. Rickerby, A. Matthews (eds), Advanced Surface Coatings: a Handbook of Surface Engineering, Blackie & Son, Glasgow (1991).
- [11] M. Kwon et al., 18th Fusion Energy Conf., Sorrento, Italy, 2000, FTP1/03(R)[IAEA-CN-77].
- [12] S. T. Kim et al., 2007 KAPPA & KPS/DPP joint workshop.

## Design of the discharge cleaning system for KSTAR vacuum vessel

S. H. JEONG and S. R. IN

*Nuclear Fusion Research Center, KAERI, Daejeon 305-353*

(Received August 20 2007)

In this paper the design of the discharge cleaning system for KSTAR vacuum vessel is described. We first discuss about the parameters which are related the efficiency of discharge cleaning. The RG( RF-assisted Glow) discharge which has the ignition and sustain pressure lower than those in the case of DC discharge, thus has the higher efficiency of discharge cleaning. So we adopt the RG discharge, in practical design, for KSTAR discharge cleaning system. For uniformity of the cleaning effect, we plan to install two discharge cleaning systems in A- and I-port of the KSTAR vacuum vessel. The designed system will be adapted for the study of the fuel recycling and of the boronization as well as the discharge cleaning of the KSTAR vacuum vessel.

Keywords : large vacuum chamber, discharge cleaning, RG(RF-assisted Glow) discharge

\* [E-mail] shjeong2@kaeri.re.kr