

KSTAR 100kV NBI 전원공급장치 운전 결과

최대준^{1,2}, 차한주²
국가핵융합연구소¹, 충남대학교²

Operation results of the KSTAR NBI 100kV power supply system

Daejun Choi^{1,2}, Hanju Cha²
National Fusion Research Institute, Deajeon, KOREA¹,
Department of Electrical Engineering, Chungnam National University²

ABSTRACT

본 논문은 미래 녹색에너지원으로 주목받는 핵융합에너지 개발 장치인 한국형 초전도 핵융합 연구로(KSTAR : Korea Superconducting Tokamak Advanced Research)의 가열장치인 중성입자빔(NBI : Neutral Beam Injector) 장치를 소개하고, 2016년 KSTAR 실험에서 빔 에너지 90/70/80 keV, 빔 출력 3.81 MW, 70.6초의 최대 장 펄스와 빔 에너지 95/90/90 keV, 빔 출력 5.13 MW, 10.6 초로 입사 운전한 NBI 장치 실험 결과를 정리한다.

1. 서론

핵융합에너지는 미래 녹색 에너지원으로 주목 받고 있다. KSTAR 장치는 국제열핵융합로(ITER 장치 : International Thermonuclear Experimental Reactor)와 동일한 구조와 자료를 사용하는 현존하는 세계 유일의 초전도 핵융합 연구 장치로서 그 운전 결과에 대한 관심이 뜨겁다. 현재 전 세계적으로 크게 두 가지 형태의 비유도성 가열 및 전류구동 장치를 사용하고 있는데, 고출력의 전자기파를 이용하는 고주파 가열장치와 고에너지의 중성입자 빔을 이용하는 장치이다. 이중 중성빔을 입사하는 NBI 장치는 보조가열장치 중 가장 효율적이고 직접적인 효과를 보이는 가열장치로서 전원장치의 기본적인 구성을 소개하고 2016년도에 수행된 KSTAR 실험 결과를 정리하여 발표하고자 한다.

2. KSTAR NBI 구성 및 2016년 운전 결과

2.1 NBI의 시스템 구성

NBI는 3 기의 이온원(Ion Source), 빔 라인(Beam Line), 전원 공급 장치(Power Supply System), 제어 및 냉각수 시스템 유틸리티(Control & Water Cooling Utility)로 구성되어 있다.

2.2 NBI 전원장치

KSTAR 중성입자빔의 전원 시스템은 이온원의 플라즈마 발생기를 위한 저전압 및 고전류 DC 전원(아크 / 필라멘트 전원 장치) 및 가속기 그리드 시스템을 위한 고전압 및 고전류 DC 전원(G1 / G3 전원장치 & 분압기)으로 이루어진다. 아크 전류의 불평형에 대해 아크 방전을 중단하기 위해 DCCT 전류 모

니터를 필라멘트 전원의 포지티브 출력 케이블에 배치하여 전류 불평형 검출한다. G1 그리드 전원은 600V 단위의 전압 제어를 위한 Chopper 시스템으로 구성된 저전압 레귤레이터와 100kV / 60A 사양의 고전압 DC 정류기 전원장치로 구성되어 있다. G2 전원의 출력 전압은 권선 저항기 탭을 단위로 변화시킴으로써, G2 그리드에 G1 전압의 80 ~ 90 %의 범위에서 공급한다. 고전압 스위치(HVS)는 MOSFET의 고속 반도체 스위치로 구성된 고전압 스위치 (HVS) 시스템으로써 이온원에 단락이 발생하면 4 μ s 이하로 off 되도록 구성되어 있다. G3 그리드 전원은 최대 5kV / 5A를 공급하는 커패시터 충전 전원을 사용하는 인버터 시스템이다. KSTAR NBI의 전원 시스템 서지 블로커(Surge Blocker)는 이온원에 연결되는 모든 고전압 케이블은 최종 출력단에 코어 스너버(Core Snubber) 시스템을 통과함으로써, 이온원 전극간 단락사고에 의한 서지전류를 감소하여 전원장치 및 이온원을 보호 할 수 있도록 되어 있다.

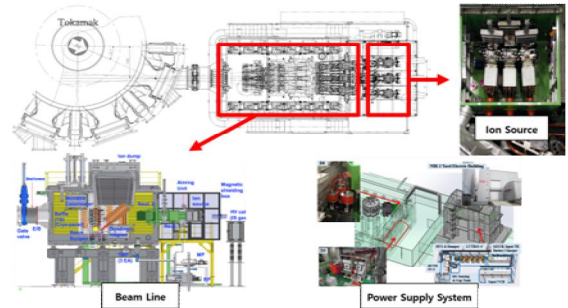


그림 1 NBI의 구성요소
Fig. 1 Configuration of NBI

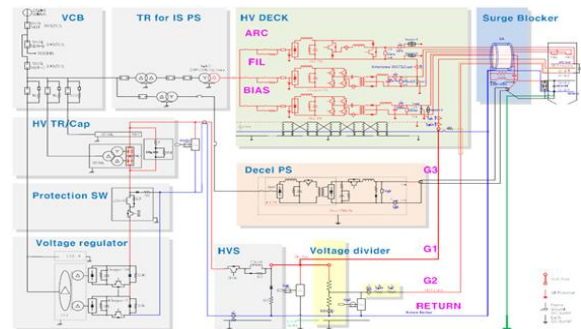


그림 2 NBI 전원장치의 단선도^[1]
Fig. 2 Single Line Diagram of NBI Power Supply System^[1]

KSTAR NBI은 각 이온원에 대해 독립적인 전원 공급 시스템을 갖추고 있다. KSTAR NBI 시스템의 이온원은 크게 플라즈마 발생부와 빔 가속부로 구분되며, 플라즈마 발생부는 아크 챔버, 필라멘트로 구성되며, 빔 가속부는 G1 ~ G4 그리드 및 전극으로 구성되어 있다. 전원 공급 시스템은 주로 이온원에서 플라즈마 생성을 위한 전원 공급 장치와 가속부 그리드 시스템을 위한 고전압 전원 공급 장치로 구성되어 있다. 플라즈마 발생부 전원 공급 장치는 각각 16V / 300A의 12 개의 필라멘트 전원 공급 장치와 160V / 1200A의 아크 전원 공급 장치이다. 가속부의 고전압 전원 공급 장치의 사양으로 G1 전원장치는 100kV / 60A 사양의 DC 발전기, G3 전원장치는 5kV / 5A의 사양의 인버터 전원장치, G2 그리드의 전원 공급을 위한 25kΩ 사양의 분압기로 구성되어 있다. 그 외 전원장치로 바이어스 전원장치, 휀 전자석 전원장치가 있다.

특히 G1 전원장치는 고전압 고전류 DC 발전기로서 50 kV, 30 kV 및 20 kV의 3 세트의 고전압 변압기 / 정류기 (HVTR) 및 각 장치의 600 V의 저전압 변압기 / Chopper (LVTR) 로 구성된 전압 조정 시스템으로 구성되어 있다.

2.3 NBI의 2016년 운전 결과

2.3.1 NBI 장 펄스 일시

2016년 KSTAR 실험에서 NBI는 3기의 이온원을 단독 운전 및 통합 운전을 통하여 KSTAR 토카막 장치에 최대 빔 에너지 95/90/90 keV, 10.6/6.2/3.5 초에서 중성 빔 출력을 5.13 MW로 입사 운전하였다. 그리고 2016년에는 가장 장 펄스로 빔 에너지 90/70/80 keV에서의 최대 70.6초 동안 KSTAR 토카막 장치에 입사 운전하였다.

그림 3은 2016년 최장 펄스의 파형을 보여준다.

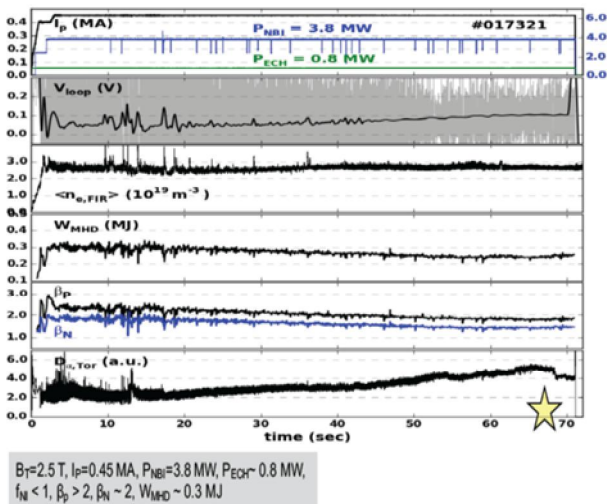


그림 3 KSTAR의 2016년 장 펄스 H-mode 달성, ~70 sec^[3]

Fig. 3 KSTAR's long pulse H-mode achieved in 2016, ~70 sec^[3]

2.3.2 NBI 운전 결과

2016년 KSTAR 실험 기간 동안 컨디셔닝 (dummy) 운전과 KSTAR 토카막 운전의 NBI 주요 운전 전원 운전조건에 대한 샷 번호 및 고장 결과 분석에 따르면, NBI 1 운전 기간 동안 dummy에 총 3143회의 입사 운전하였다. 이 중에서 이온원 동시 운전은 1141회 입사 운전하였다. 제 1 이온원과 제 2 이온원, 제 3 이온원은 각각 33회, 374회, 506회 단독 입사 운전하

였으며, 빔 에너지 90 ~ 100 keV / 5 초 미만의 컨디셔닝 입사 운전을 가장 많이 하였다.

KSTAR 토카막에는 총 1519회의 입사 운전하였으며, 요구된 펄스 시간동안 성공적으로 빔 입사가 이루어진 비율은 69.72 %로 NBI 자체 문제로 인한 고장 (7.18 %)보다 KSTAR에서 강제로 빔을 차단하는 고장에 의한 문제 (23.11 %)가 여전히 높다고 할 수 있다. 또한 2016년 실험에서는 3기의 이온원을 운전하는 상황에서 자체 고장 발생율이 지난 2015년 이온원 시험 때 (5.84 %) 보다 높은 비율로 나타났는데, 이는 장 펄스의 빔 인출로 인한 고전압 단락에 의해서 가스 주입 시스템 및 전원장치에 영향을 주는 고장이 빈번히 발생하였다.

표 1 NBI 컨디셔닝 빔 인출(a), NBI KSTAR 빔 인출(b)^[2]
Table 1 NBI conditioning shot(a), NBI KSTAR Tokamak shot(b)^[2]

IS 1						IS 1					
V_start	0≤ 15	1≤ 5	5≤ 10	10≤ 15	SUM	V_start	0≤ 15	1≤ 5	5≤ 10	10≤ 15	SUM
E≤ 60	137	17	6	0	160	E≤ 60	15	9	0	0	24
60≤ 80	203	20	0	0	223	60≤ 80	15	72	51	4	142
80≤ 90	147	24	0	0	171	80≤ 90	13	78	54	83	228
90≤ 100	548	178	0	0	726	90≤ 100	41	214	195	193	643
SUM	1035	239	6	0	1280	SUM	84	373	300	280	1037
IS 2						IS 2					
V_start	0≤ 15	1≤ 5	5≤ 10	10≤ 15	SUM	V_start	0≤ 15	1≤ 5	5≤ 10	10≤ 15	SUM
E≤ 60	331	244	15	11	601	E≤ 60	15	12	16	4	47
60≤ 80	309	411	17	5	742	60≤ 80	60	126	94	77	357
80≤ 90	205	253	10	0	468	80≤ 90	5	41	52	42	140
90≤ 100	173	295	10	0	478	90≤ 100	1	1	0	0	2
SUM	1018	1203	52	16	2289	SUM	81	180	162	123	546
IS 3						IS 3					
V_start	0≤ 15	1≤ 5	5≤ 10	10≤ 15	SUM	V_start	0≤ 15	1≤ 5	5≤ 10	10≤ 15	SUM
E≤ 60	302	16	6	0	324	E≤ 60	12	8	2	1	23
60≤ 80	349	211	3	0	563	60≤ 80	30	81	50	42	203
80≤ 90	269	285	8	0	562	80≤ 90	52	196	156	122	526
90≤ 100	361	612	0	0	973	90≤ 100	12	7	17	8	44
SUM	1281	1124	17	0	2422	SUM	106	292	225	173	796

(a)

(b)

3. 결론

NBI는 3기의 이온원, 빔 라인, 전원 공급 장치, 제어 및 냉각수 시스템 유틸리티로 구성되어 있다. 2016년 KSTAR 실험에서 3기의 이온원으로 컨디셔닝 운전은 빔 에너지 100/100/100 keV, 빔 출력 5.8 MW, 2.5초를 운전하였으며, KSTAR 운전에서 빔 에너지 90/70/80 keV, 빔 출력 3.81 MW, 70.6초의 최대 펄스와 빔 에너지 95/90/90 keV, 빔 출력 5.13 MW, 10.6 초로 입사 운전하였다. 이는 2016년도의 고성능 플라즈마 운전(H Mode)에서 세계 최장시간 기록이다.

참고 문헌

- [1] W. Cho *et al.*, "Power supply system for KSTAR neutral beam injector", Fusion Engineering and Design 96 97 (2015) 425 432
- [2] D. J. Choi *et al.*, "NBI 1 Result of 2016 KSTAR Campaign and Development plan of NBI 2", KSTAR Conference 2017
- [3] S. J. Wang *et al.*, "Heating and Current Drive : Status and Preparation", Korea Japan Joint workshop on RF Heating Physics in Fusion Plasmas 2016