'2000 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

원형 빔 인출구를 갖는 대전류 이온원 가속부의 설계

Design of the Circular Aperture Grids for the High Current Ion Source

오 병훈, 윤 병주, 김 경석, 조 용기, 장 대식, 최 병호

한국원자력연구소

요 약

대전류 빔 인출을 위한 원형 빔 인출구를 갖는 이온원의 가속부를 설계하였다. 현재 한국원자력연구소에서 KSTAR(Korea Superconducting Tokamak Advanced Research)의 중성빔 입사장치(Neutral Beam Injection System)용으로 개발 중인 이온원은 빔의 크기가 12 cm x 43 cm 이고 최대 빔 인출 전압이 120 kV, 빔 전류가 65 A인 대형 이온원이다. 이 이온원은 원래 미국 LBL(Lawrence Berkely Lab.)에서 개발한 것으로 빔인출을 위한 4극형 가속부는 냉각과 대전류 빔인출을 위해 특수한 단면 형상을 갖는 molybdenum 관들이 평행으로 배열된 slit 구조로 되어있어서, 이를 그대로 제작하는데 비용적인 측면과 기술적인 측면에서 많은 어려움이 따르고 있다. 본 연구에서는 이를 극복하기 위한 대안으로 slit형으로 된 가속전극 대신 원형의 인출구들로 이루어진 가속부를 설계하여 그 성능을 예측한 결과에 대해 논의하였다.

Abstract

The circular aperture grids for the high current ion source has been designed. The ion source, which is in developing for the KSTAR Neutral Beam Injection(NBI) System in KAERI(Korea Atomic Energy Research Institute), has the beam size of 12 cm x 43 cm, the mximum beam energy of 120 keV, and the maximum beam current of 65 A. This source, which was originally developed in LBL(Lawrence Berkely Lab.) about 15 years ago, has the slit grid structure for the high current beam extraction. The slits are made of specially shaped water tubes with molybdenum(Mo) for the beam optics and long pulse operation, but the price and the technology of making the tubes and brazing are very difficult. Therefore we are now trying to develope the circular aperture grids as an alternative of the Mo slit grids. Here the designed results of the circulr aperture grids and the expected beams are described.

1. 서론

중성빔 입사장치는 현재 토카막에서 사용되고 있는 가열장치 중 가장 신뢰성 있는 가열 장치로 플라즈마 밀폐를 중점적으로 연구하는 중형 이상의 토카막에서는 기본적으로 갖추어야할 장비중의 하나이다. 저항가열에 의해 어느 정도 뜨거워진 플라즈마에 중성빔의 형태로 추가 에너지를 외부에서 가해줌으로서, 핵융합 반응에 의한 점화조건과 가까운 상태의 플라즈마를 만들어 이에 대한 연구를 수행할 수 있다. 이 외에도 중성빔 입사에 의해 전류구동, 플라즈마 밀도 및 전류의 분포제어 등의 효과가 얻어지고, 플라즈마에 입사된 후 나오는 입자들을 측정하여 플라즈마의 온도, 밀도 분포 등에 대한 정보도 알아낼 수 있다[1]. 핵융합 연구 장치의 크기가 대형화되면서 플라즈마의 크기와 밀도가 증가하고 따라서 플라즈마 중심에 도달하기 위해 필요한 빔에너지가 증가하면서 중성빔 입사장치의 이온원은 점점 고전압, 대전류를 만들어 낼 수 있는 방향으로 개발이 진행되고 있다. 현재 우리 나라에서 핵융합 연구의 활성화를 위하여 2005년 운전을 목표로 건설이 추진되고 있는 KSATR 장치[2]는 초전도 전자석 코일에 의해 구동되는 토카막 장치로 준연속 운전에 의하여 핵융합로에 필요한 과학적 · 기술적 자료들을 구축하는 것을 목표로 하고 있으며, 이러한 목표를 달성하기 위해 필요한 가열장치로 중성빔 입사장치인 경우 2 개의 빔라인에 의해 16 MW의 가열 효과를 낼 수 있도록 한국원자력연구소에서 KSTAR 토카막의 중성빔 입사장치들을 개발하고 있다.

중성빔 입사장치는 이온원에서 만들어진 빔을 강한 자장으로 둘러싸인 플라즈마 중심까지 효과적으로 수송하기 위하여 여러 가지 부품들로 구성되는데 장치 전체의 성능이 이온원의 성능에 크게 좌우된다. KSTAR 중성빔 입사장치에서 필요로 하는 이온원은 빔에너지가 120 kV, 빔전류가 65 A, 운전시간이 300 초인 초대형 이온원으로 현재까지 국내에서 개발 경험이 없고, 이온원의 개발에 필요한 충분한 연구 기간이 주어지지 않는 다는 점을 고려하여 이미 개발이 완료된 기존의 대형 이온원을 모델로 하여 제작하고 필요한 부분을 개선하는 방향으로 개발이 진행되고 있다. 미국의 TFTR 토카막에서 사용되었던 양이온원 (positive ion source ; 120 kV, 65 A, 10 초 운전 기록)을 모델로 KSTAR prototype 이온원[3]을 제작하여 시험이 진행되고 있으나, TFTR 이온원의 가속 전극은 냉각과 대전류 빔 인출을 위해 특수한 단면 형상을 갖는 molybdenum 관들이 평행으로 배열된 slit 구조로 되어 있어서 이를 그대로 제작하는데 비용적, 기술적인 측면에서 많은 어려움이 따르고 있다. 본 연구는 이를 극복하기 위한 대안으로 국내기술 및 적정한 비용으로 제작할 수 있는 원형 인출구를 갖는 가속전극, 최종적으로는 이온원의 가속부를 설계하고 제작하는 것을 목적으로 하고 있다. 가속부 설계에 필요한 전극 두께, 인출구의 크기, 전극 간의 거리, 냉각관 직경 및 인출구 사이의 거리를 120 kV, 65 A, 300 초 운전 조건에 맞도록 결정하였고, 원형 인출구의 가속전극을 개발하는 시간을 가능한 한 단축하기 위해 기존에 제작된 이온원들의 데이터들을 기준으로 하여 자체적인 검증을 거쳐서 적용하는 것을 기본 원칙으로 하였다. 제 2 장에 이온원을 설계하는데 기본이 되는 parameter들을 결정한 방법들에 대해 논의하고. 3장에서 빔 인출을 위한 최적의 형상을 결정하며, 4장에서는 장시간 운전을 위해 반드시 필요한 가속전극의 냉각 방법 및 열해석 결과에 대해, 5, 6장에서는 빔 인출시 운전 및 오차 정렬 등에 따른 결과 및 그 대책과 전극 및 가속부 제작하는 방법 등에 대해 논의한다.

2. 이온원 전극 설계를 위한 기본 parameter 결정[4]

이온원의 빔 인출을 위한 가속부는 50 kV 이하의 경우 3단 가속(플라즈마 전극, 감

속 전극, ground 전극)으로 충분하지만, 전압이 이 보다 높아지면 중간에 gradient 전극을 더 넣어서 플라즈마 전극과 감속 전극사이의 전위분포를 따로 제어해주는 것이 훨씬 효과적이다. gradient 전극으로 중간의 전위 분포를 적절히 제어함으로서 3 단 가속에 비해 좋은 렌즈 효과를 얻을 수 있고, V_{PG}/V_{GG} 비의 조절에 의해 플라즈마 조건 맞는 운전 조건을 만들어 줄 수 있는 범위를 넓혀주고, 대전류 및 준 운전 조건에 중요한 열부하 분산 역할을 해 줄 수 있다. 대전류 빔인출을 위한 4 단 가속부의 설계에 필요한 중요한 변수들을 그림 1에 정리하여 표시하였고, 이 변수들을 결정하는 방법 등에 관하여 논의한다.

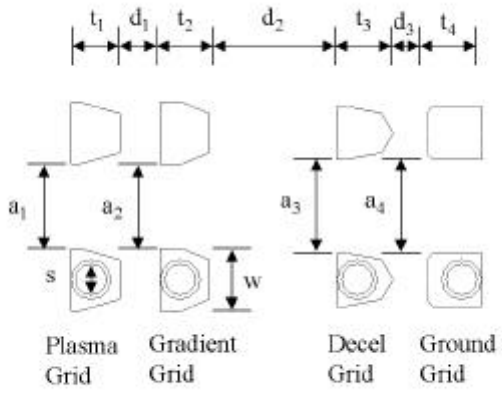


그림 1. 4 단 가속 대전류 빔 인출 가속 전극 설계에 필요한 변수들

(1) 전극두께의 결정

전극의 최소 두께(t1, t2. t3, t4)는 인출구 형상 가공과 필요한 냉각 체널 확보를 위해 필요한 최소한의 판의 두께에 의해 결정이 되고, 최대 두께는 냉각 효과를 극대화하고 전극의 수명 및 경제성 등을 고려하여 결정하게 된다. 보통 양이온원의 경우 전극의 두께는 무산소동으로 제작할 때 1.5 mm에서 3.5 mm 이내의 두께로 제작되는 것이 일반적인데, 장시간 운전에 필요한 냉각수 체널을 확보하면서 대전류 빔인출을 위한 충분한 투과도(transparency)의 확보를 위해 최소 내경 1.2 mm 의 냉각관이 전극의 내부를 통과할 수 있도록 전극의 두께를 플라즈마 전극과 gradient 전극의 두께는 2.2 mm 로, 감속전극과 ground 전극은 2.5 mm 로 JAERI에서 제작한 양이온원[5]과 동일한 값으로 결정하였다. 냉각능력에 대한 검토는 이에 대한 검토는 4장에서 수행하였다.

(2) 전극 구경의 결정

전극의 구경은 빔의 투과도를 결정하는 데 중요한 역할을 하기 때문에 동일한 면적의 전극에서 가능한 한 많은 전류의 빔을 얻기 위해서는 크게 하는 것이 좋겠지만 빔 광학적 측면에서 전극구경이 전극 두께에 비해 너무 크면 인출구의 가공 효과가 없어지면서 빔의 수송효율이 떨어지게 되고, 반대로 전극 구경이 전극 두께에 비해 너무 작으면 인출구 주위에 만들어지는 수차에 의한 손실이 커져서 빔 휘도가 나빠지게 된다. 표 1에 인출구경에 따라 13 cm x 45 cm 면적의 빔으로부터 얻을 수 있는 투과도와 전류밀도에 따른 예상 인출 전류를 계산한 결과를 보였다. 또한 특히 플라즈마 전극의 구경은 다음 절에서와 같이 전극과의 거리도 고려하여 결정해 주어야하는 값이다. 일반적으로 플라즈마 전극의 구경은

으로 보통 전극 두께의 1.5 - 3 배 내에서 결정을 하게되는 데, 다음 절에서 결정할 전극간의 거리(4.5 mm)를 고려하여 플라즈마 전극과 gradient 전극의 인출구의 직경은 4 mm로 하고, 감속전극과 접지전극의 인출구 직경은 플라즈마 전극의 경우보다 조금 큰 4.4 mm로 결정하였다. 표 1에서 보였듯이 플라즈마 전극의 인출구를 4 mm로 할 경우 이온원의 투과도는 35 %이지만, 직경을 5.4 mm로 하면 빔 투과도를 40% 이상 올릴 수 있으나 전극간의 거리보다 인출구의 직경이 커짐으로서 생기는 빔의 질의 저하를 우려하여 4 mm로 최종적으로 결정하였다.

표 1. 인출구경에 따른 빔 투과도 및 인출 전류의 변화

hole dia.(mm)	**5.4**	**4.5**	**4**
cooling channel width(mm)	2.8	2.8	2.8
bare channel width(mm)	1.2	1.2	1.2
emission length(S)(mm)	450	450	450
emission length(L)(mm)	130	130	130
beam current density(A/cm2)	0.3	0.3	0.3
transparency	0.42	0.38	0.36
beam current(A)	74.27	67.08	62.37
beam current per a hole(A)	0.07	0.05	0.04
hole number	1081	1406	1654

(3) 전극간 거리의 결정

전극간의 거리를 결정하는 데 고려해야할 parameter들로는 빔의 광학적 렌즈 효과를 극대화 시켜주기 위해 전극간의 거리가 인출구의 반경보다 크게 유지시켜주어야 한다는 조건 외에, 두 전극 사이에 걸리는 고전압을 견딜 수 있도록 충분한 거리를 유지시켜야한다는 조건과 빔인출 전류($I \propto a^2/d^2$)가 전극간의 거리의 제곱에 반비례하기 때문에 가능한 한 많은 전류를 뽑아내기 위해서는 전극간의 거리를 좁혀야한다는 조건을 절충시켜 최대의 전류를 안전하게 뽑아낼 수 있도록 설계되어야 한다는 것이다. 실험적으로 이온원 운전 가능 전압이 11 kV/mm 정도임을 감안하고 다음 장에서 보인 beam optics 계산 결과들을 근거로 다양한 플라즈마 및 운전 조건의 변화에 대응하기 위해 V_{PG}/V_{GG} 비를 0.9에서 0.65까지 운전이 가능한 최소한의 전극간의 거리를 결정하였다. 120 kV의 빔을 인출할 경우 운전 조건에서 V_{PG}/V_{GG} 비를 0.9에서 0.65로 변화시킨다는 것은 플라즈마 전극과 gradient 전극간의 최대 45 kV 가 걸리고 gradient 전극과 감속전극간에 최대 110 kV가 걸린다는 것을 의미한다. 진공 중에서 전극의 간격에 의해 유지할 수 있는 전압이 거리에 비례하지는 않지만 대부분의 이온원 설계에서는 비례법칙을 적용하여 설계하고 있기 때문에 본 연구에서도 mm당 견딜 수 있는 전압을 10 kv로 적용하여 플라즈마 전극과 gradient 전극간의 거리(d1)는 4.5 mm, gradient 전극과 감속전극간의 거리(d2)는 11 mm, 감속전극과 접지 전극 간의 거리(d3)는 2.5 mm로 결정하였다.

(4) 가속전극 절연부 길이의 결정

이온원 가속전극 사이에서 전극들을 고정하고 전극 외부를 통한 방전을 방지하게

하기 위한 절연부는 진공특성, 재료의 가공특성 및 조립 후 기계적 강도를 고려하여 세라믹 또는 에폭시 그라스를 적층한 것을 가공하여 만들 수 있다. 절연부의 길이를 결정하는 데 고려해야할 parameter 들로는 공기의 절연 파괴 전계가 30 kV/cm 임을 고려하여 일시적으로 두 전극간에 arcing 이 발생해서 나머지 두 전극간에 모든 전압이 집중되더라도 절연체를 통해서는 방전이 발생하지 않도록 충분한 간격을 유지해 주어야 한다는 것이다. 그렇지 않을 경우 반복되는 방전 피로에 의해 절연부의 절연 강도가 점점 약해지게 되어 최종적으로 절연부로서의 역할을 못하게 되어 최악의 경우 가속부를 전체적으로 교체해야 하는 결과를 초래할 수 있다. 절연체의 길이는 각 전극에 걸릴 전압(전극간격)에 비례하면서 기존의 가속부 전극 구조(TFTR 이온원)를 가능한 그대로 이용할 수 있도록 플라즈마 전극과 gradient 전극간의 절연체 길이는 55 mm, gradient 전극과 감속전극간의 절연체 길이는 125 mm, 감속전극과 접지 전극 간의 절연체 길이는 30 mm로 결정하였다. 절연체 길이는 전극 구조가 평판형인 경우 문제가 되지 않지만 전극과 절연부의 구조가 부분적으로 전계를 강하게 만들어 공기 절연파괴 전계인 30 kV/cm를 부분적으로 넘게 만들어 방전 파괴를 일으킬 수 있기 때문에 전극과 절연체의 구조를 설계하는 데도 고려되어야할 부분이다. 실제로 이온원을 120 kV로 운전할 때는 SF_6 gas를 이온원 외부에 채워준 상태에서 하기 때문에 더 안전한 운전이 될 것으로 기대된다.

3. 최적 빔 인출구 형상의 결정

이온원 설계에 있어서 빔 인출구의 형상은 빔의 발산각(divergence), 수차(aberration) 및 열부하 등을 결정하는 중요한 요소 중의 하나로 플라즈마 전극의 형상은 최초의 빔 발산각이 최소화할 수 있는 구조로, gradient 전극은 플라즈마 전극 인출구멍의 주변을 지나온 이온들의 렌즈 수차를 작게해 주는 구조로, 감속 전극의 모양은 전극 표면에서 방출된 2차 전자들이 상위의 인출 전극들에 열부하를 주지 않도록 하는 구조를 갖도록 만들어주어야 한다. 인출구 형상의 결정은 빔인출 시뮬레이션을 수행할 수 있는 코드를 사용하여 빔 인출조건에 적합한 최적의 형상을 결정해 낼 수 있는데, 이온빔의 최초 방출각을 결정하는 플라즈마 전극의 형상은 Larry Grisham[6] 등이 수행한 Pierce 형의 인출구를 기준으로 여러 가지 형상에 따른 빔인출 시뮬레이션 결과를 참고로 하여 최초의 형상을 결정하고, 나머지 인출구의 형태는 JAERI ion source를 기준으로 작업을 시작하였다. 그림 2는 플라즈마 전극의 모양만을 변경시키고 빔인출 시뮬레이션을 수행한 결과를 발산각(Af) 및 에미턴스를 비교하여 인출구의 효용성을 판단할 수 있도록 정리한 그림이다. 플라즈마 전극의 모양이 Larry Grisham 등에 의한 형상과 형상가공을 하지 않은 직사각형 단면 형상과의 중간 모양을 가질 경우가 더 빔의 인출 특성이 좋아짐을 알 수 있었다. 이는 Larry Grisham 등이 수행한 전극의 경우 빔에너지가 40 kV 이내로 3단 가속에 의한 빔인출일 경우에서 도출된 결과이기 때문에, 이온원의 인출 전류와 인출 에너지가 증가하게되면 당연히 요구되는 변화이다. 같은 방법으로 gradient 전극, 감속 전극 및 접지 전극의 형상을 변화시키면서 형상 변화에 의한 빔의 영향을 관찰한 결과를 그림 3 및 그림 4에 정리하였는데, 이온원 전극 한 개를 구성하는 빔 인출구의 수가 1000개 이상이나 되기 때문에 인출구의 형상 가공에 들어가는 노력이 만만치 않아서 인출구의 형상을 단순화시킬 수 있는 가능성도 동시에 판단하였다. 시뮬레이션 결과 그림에서 보여주는 것처럼 플라즈마 전극 외의 전극들은 형상 가공을 굳이 하지 않아도 빔인출 특성에 크게 영향을 미치지 않았기 때문에 인출구들의 최종 형상을 그림 5와 같이 플라즈마 전극만 가공하고 나머지 전극들은 그대로 두는 형태를 취하

도록 설계하였다.

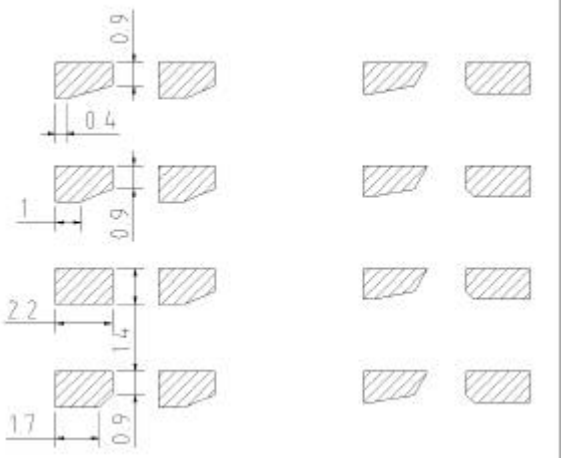


그림 2 플라즈마 전극의 인출구 형상에 따른 인출 빔의 특성

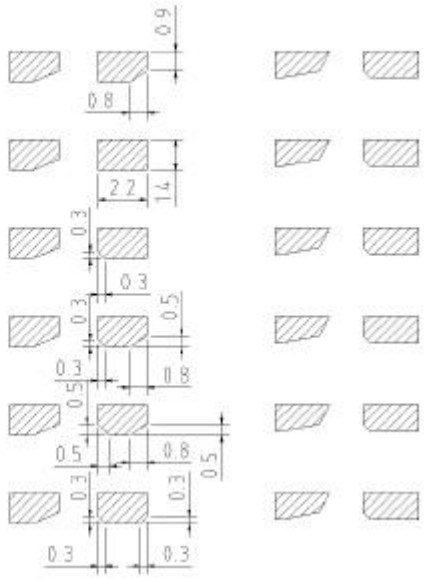


그림 3 gradient **전극의 인출구 형상에 따른 인출 빔의 특성**

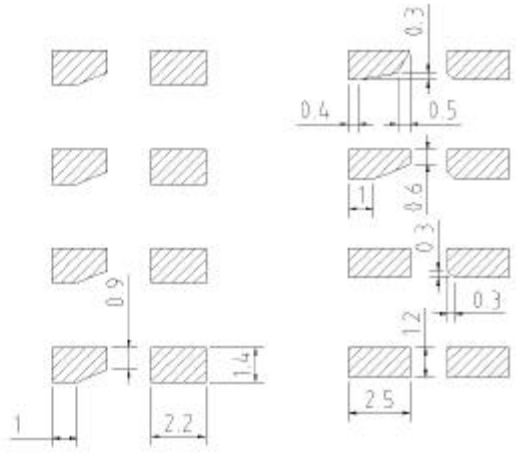


그림 4 **감속 전극 및 플라즈마 전극의 인출구 형상에 따른 인출 빔의 특성**

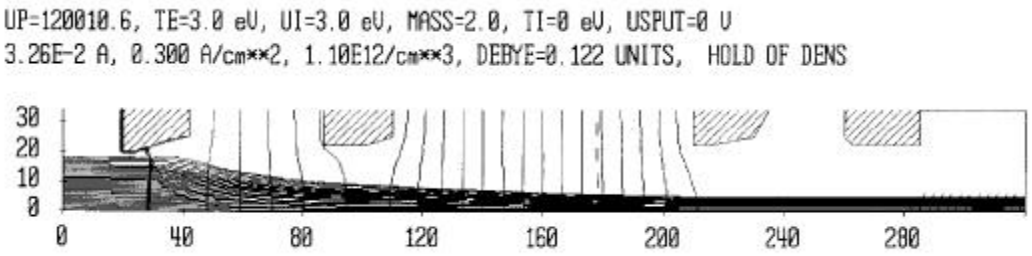


그림 5 **최종 결정된 인출구 형상에 의해 인출된 빔의 궤적** (120 kV, 65A)

4. **전극 냉각구조 설계 및 열 해석결과**

이온원이 장시간 운전되기 위해서는 인출구 주변에 냉각관들이 적절히 설치되어 이온 빔 또는 역류되는 전자들에 의해 발생하는 열부하를 충분히 제거해 줄 수 있어야 한다. 설계된 전극의 두께가 2.2 mm**와** 2.5 mm**인 것을 감안하여 내경** 1.2 mm**의 파이프를 전극 인출구들 사이에 그림** 6**과 같이 장착한다. 전극구간의 거리는 오차를 포함한 인출구 형상 및 냉각관 가공 공간과 필요한** transparency **확보를 위해 최적의 값이 선택되어야하는데 냉각관과 평행한 방향의 거리는 플라즈마 전극의 경우** 1.2 mm, **다른 전극의 경우** 0.8 mm **로, 냉각관과 수직한 방향으로 인출구 사이의 거리는 플라즈마 전극의 경우** 2.8 mm, **다른 전극의 경우는** 2.4 mm**로 결정하였다.**

이온원 전극의 열부하는 이온원 자체의 특성상 골고루 나누어져서 가해지는 것이 아니기 때문에 최악의 경우를 아래와 같이 상정하여 ANSYS **프로그램**[7]**을 사용하여 계산하였다.**

플라즈마 전극 : **상판** : 153 W/cm^2 (arc & filament power)
밑판 : 183 W/cm^2 (1.5 % total power)
그 외 전극 : **밑판** : 183 W/cm^2 (1.5 % total power)

냉각관 속을 흐르는 물의 양이 6 m/sec **인 경우 플라즈마 전극의 열해석 결과를 그림** 6**에, 감속 전극의 해석 결과를 그림** 7**에 나타내었다. 물의 유속이** 6 m/sec **가 되기 위해서는 한** set**의 전극 당 약** 0.5 litter/sec**의 물을 공급해 주어야하는데, 플라즈마 전극의 경우 최대 온도점은 역류 전자에 의해 집중적으로 열을 받는 밑판에서 형성되는데 온도가 최대** 186 °C **로 무산소동의 용융점이** 1084.5 °C, **재질 변성점 약** 500 °C**임을 고려하면 설계된 냉각 설비가 충분함을 알 수 있다. 이 때 냉각수의 온도 상승은** 49.53 °C**로 허용 온도상승치** 50 °C **이하를 만족하는데, 냉각관 속을 흐르는 물의 유속을** 9 m/sec**로 만들어주었을 때 물의 온도 상승을** 40 °C **이하로 낮출 수 있다. 다른 전극의 경우도 열부하가 집중적으로 일어나는 최대 온도 형성점이** 200 °C **내외에서 만들어진다. 그리고 실제 전극들의 열부하는 계산에서 입력으로 준 값들보다 낮을 것이기 때문에 설계된 전극들의 냉각능력은 열부하에 건전하다는 것을 알 수 있다.**

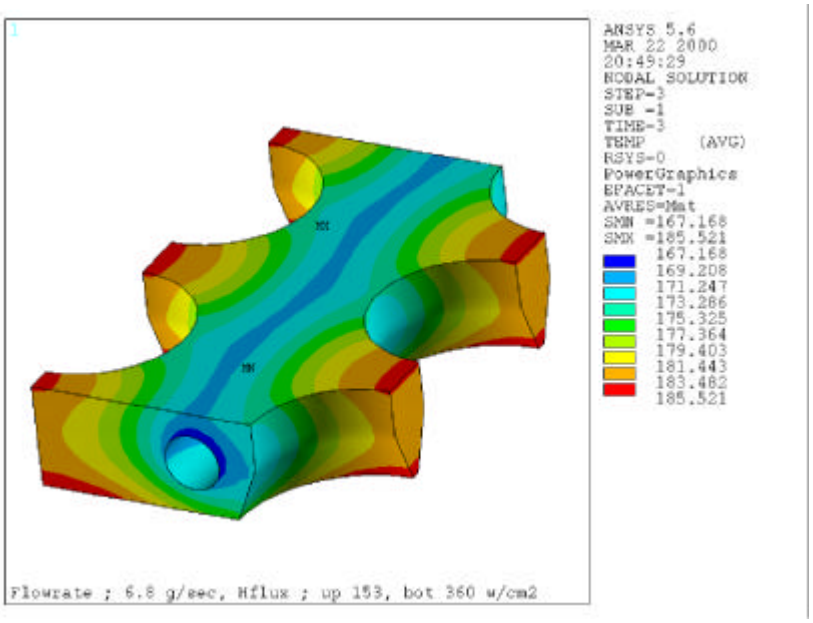


그림 6 플라즈마 전극의 열해석 결과 (냉각관 물의 유속이 6 m/sec 인 경우)

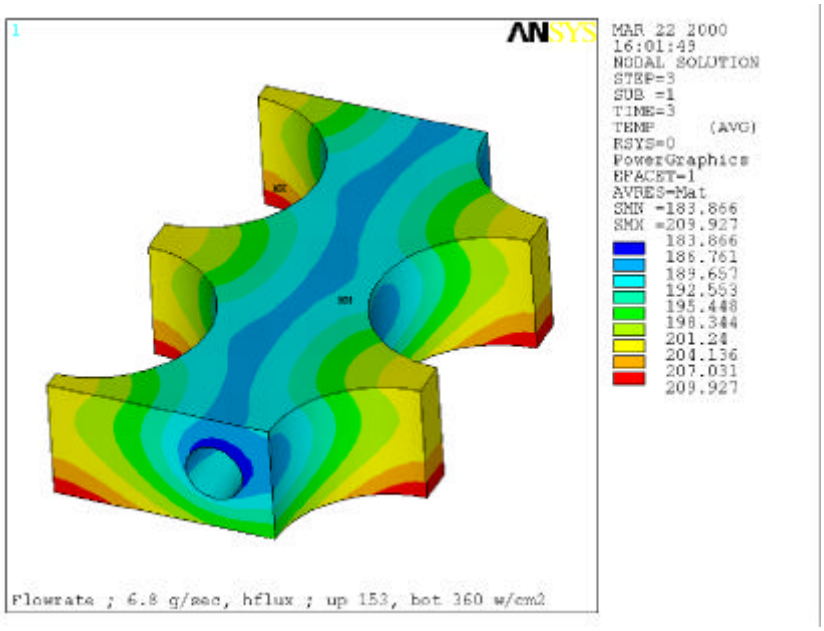


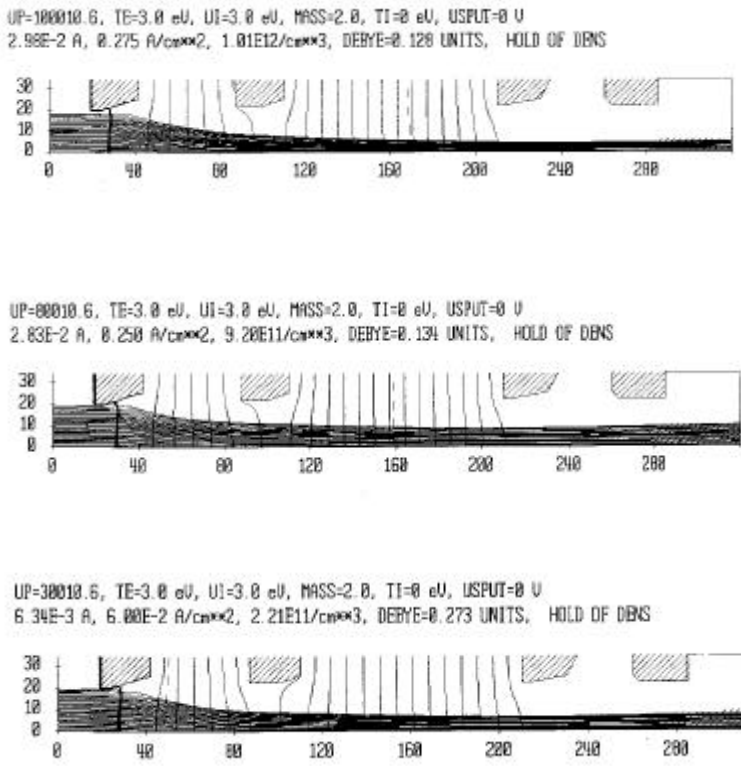
그림 7 감속 전극의 열해석 결과 (냉각관 물의 유속이 6 m/sec 인 경우)

5. 운전 및 오차에 의한 영향평가

가속전극들이 완성되어 실제 빔을 인출하는 단계에 이르게 되면 설계하는 데 사용한 조건과는 달라질 수 있는 변수들이 운전에 영향을 미칠 뿐만 아니라 목표한 이온원의 성능을 제대로 못 내게 할 가능성도 무시할 수 없다. 본 장에서는 운전에 영향을 줄 수 있는 변수들의 변화에 따른 인출 빔의 특성을 파악하여 가능한 변화에 충분히 대응할 수 있는가에 대한 검토작업을 수행한 결과에 대해 논의한다.

(1) 운전 전압에 따른 빔 인출 특성

이온원의 가속전극은 인출하는 빔의 종류, 에너지 및 전류에 적합하도록 인출구의 구경과 형태, 전극간의 간격 등이 결정된다. 빔을 인출하는 전압이 달라지면 운전 조건도 달라져야하는데, 본 연구에서의 인출 전극의 설계가 120 kV, 65 A(V_{PG}/V_{GG} = 0.75)의 중수소 빔을 기준으로 설계되었기 때문에 인출 전압이 변화하였을 때도 정상적인 빔을 어떤 조건에서 얻을 수 있는 가를 판단하기 위해 인출전압에 따른 빔 인출 시뮬레이션을 수행하였다. 인출전압이 100 kV, 80 kV, 30 kV 일 때 정상적인 빔을 얻어낸 결과를 그림 8에 나타내었다. 그림에서 보듯이 120 kV에서 설계된 전극이지만 운전조건 중 V_{PG}/V_{GG} 비와 플라즈마 밀도를 적절히 조절해 줌으로서 전압에 대응하는 양질의 이온 빔을 얻을 수 있음을 알 수 있다.



(a) Vacc = 100 kV
V_{PG}/V_{GG} = 0.7
σ = 0.275 A/cm^2
(σ; 인출전류밀도)

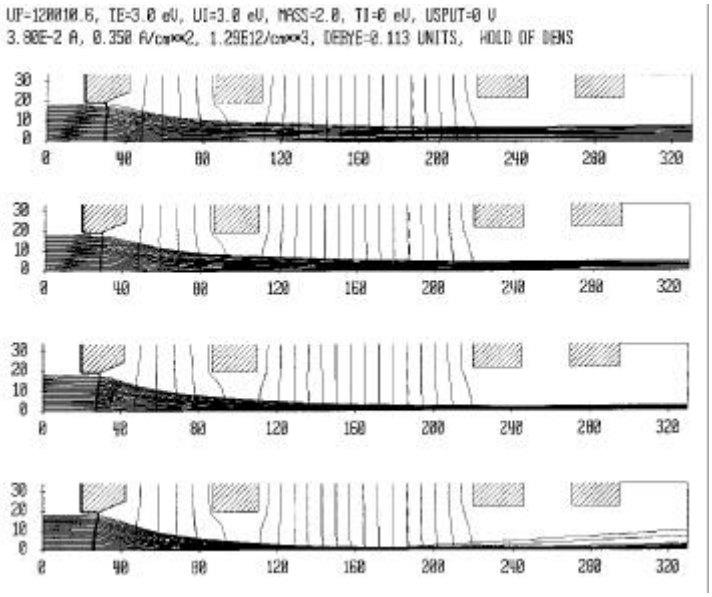
(a) Vacc = 80 kV
V_{PG}/V_{GG} = 0.7
σ = 0.25 A/cm^2

(a) Vacc = 30 kV
V_{PG}/V_{GG} = 0.67
σ = 0.06 A/cm^2

그림 8 인출전압에 따른 빔 인출 조건의 변화

(2) 플라즈마 이온 밀도에 따른 빔 인출 특성

이온원의 빔 인출 조건은 플라즈마 밀도에 따라 크게 달라질 수 있다. 플라즈마 이온 밀도가 필요한 값보다 많거나 작으면 운전조건을 바꿔주지 않는 한 정상상태의 빔을 얻을 수 없다. 그림 9는 동일한 운전조건에서 인출 빔이 전류밀도에 어떤 영향을 받는 가를 보기 위해 전류밀도의 변화에 따른 빔인출 결과를 정리한 그림이다. 전류밀도가 증가하면 이온들의 공간전하에 의한 반발효과가 빔을 벌어지게 만들고, 전류밀도가 감소하면 반대로 과집속 상태가 되어 빔 수송이 불안정해짐을 볼 수 있다. 밀도의 변화에 대응하여 V_{PG}/V_{GG} 값을 적절히 조절해 줌으로서 그림 10과 같이 양질의 빔을 인출 할 수 있다.



(a) σ = 0.35 A/cm^2

(b) σ = 0.3 A/cm^2

(c) σ = 0.25 A/cm^2

(d) σ = 0.2 A/cm^2

그림 9 전류밀도의 변화에 따른 빔인출 결과(120 kV, V_{PG}/V_{GG} = 0.75)

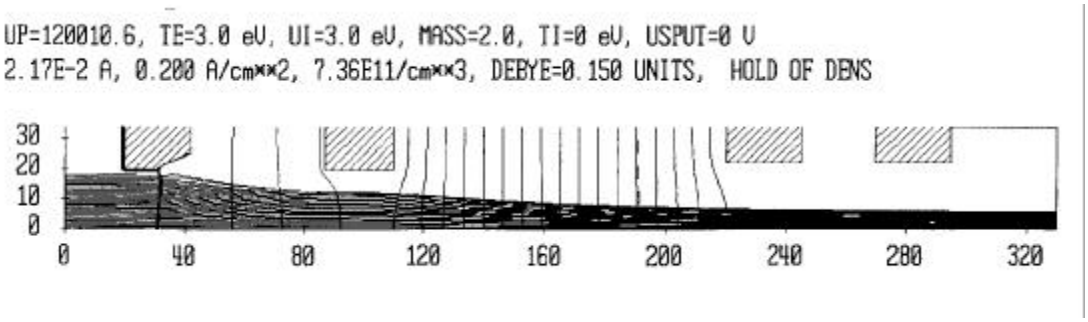


그림 10 밀도의 변화에 대응한 이온원의 운전 결과

(120 kV, σ = 0.2 A/cm^2, V_{PG}/V_{GG} = 0.85)

(3) 운전조건 V_{PG}/V_{GG} 에 따른 빔 인출 특성

플라즈마 상태에 따라 바뀔 수 있는 빔인출 특성의 변화는 운전 조건을 제어함으로서 인출 빔의 모양을 최적으로 만들어 갈 수가 있다. 이온원 운전시 제어가 가능한 운전 조건 중 가장 효과적인 것이 V_{PG}/V_{GG}의 제어이다. 그림 11은 120 kV의 빔을 인출할 때 V_{PG}/V_{GG}에 따른 빔의 특성을 보여주고 있는데, V_{PG}/V_{GG} 값을 작게 해줄수록 빔을 집속시켜 주는 효과가 있음을 볼 수 있다.

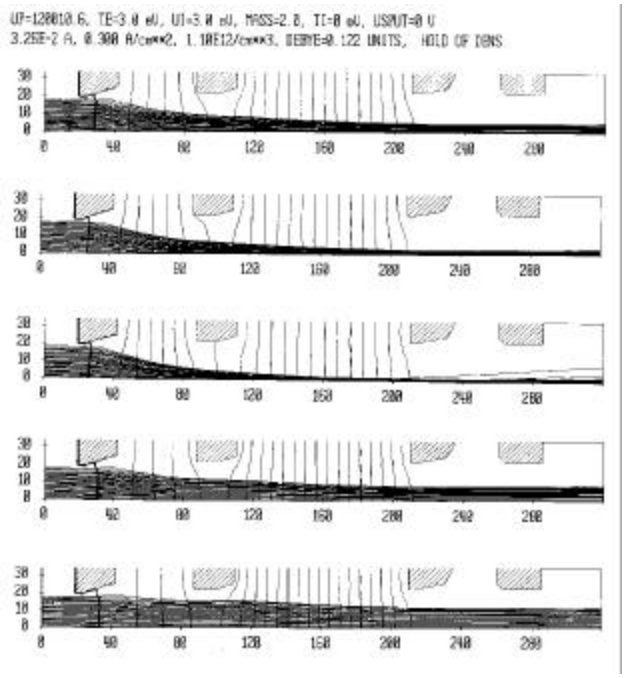


그림 11 120 kV 빔의 인출 시 V_{PG}/V_{GG}에 따른 인출 빔의 특성

(4) 가속전압의 리플에 따른 빔 인출 특성

지금까지의 결과에서 예측할 수 있듯이 가속전원의 전압이 변하면 그에 따른 빔 인출 특성도 달라지기 때문에 전원 자체의 전압 리플 크기가 빔의 질을 결정하는 요인이 될 수도 있다. 그림 12는 120 kV 가속 전극의 전압 리플이 1 %인 경우와 5 %인 경우 인출 빔의 특성을 자세히 보기 위해 인출 빔의 수를 더 늘이고 인출영역을 빔 인출구 끝까지 확대하여 시뮬레이션 한 결과를 보여주고 있다. 리플이 1 % 인 경우 인출특성이 크게 변하지 않으나 리플이 5 %가 되면 심각한 결과를 초래함을 알 수 있는데, 실제 KSTAR 중성빔 입사장치의 이온원의 경우 gradient 전극의 전압은 독립적인 전원으로 이루어지는 것이 아니고, 가속전원에서 저항들을 이용하여 분압시킨 전압을 공급하게 되기 때문에 가속전극의 리플은 gradient 전극의 리플의 파형과 정확하게 일치하게 된다. 그림 13은 가속전극과 gradient 전극 모두에 5 %의 리플이 동시에 주어졌을 때 빔 인출 결과를 보인 그림이다. 그림에서 보여주듯이 인출 빔의 특성이 독립적인 전원을 쓸 때보다 매우 개선됨을 알 수 있는데, 저항분압 방식으로 gradient 전원의 전압을 공급하게되면 2 % 이내의 리플은 크게 빔 특성에 영향을 미치지 않음을 알 수 있었다.

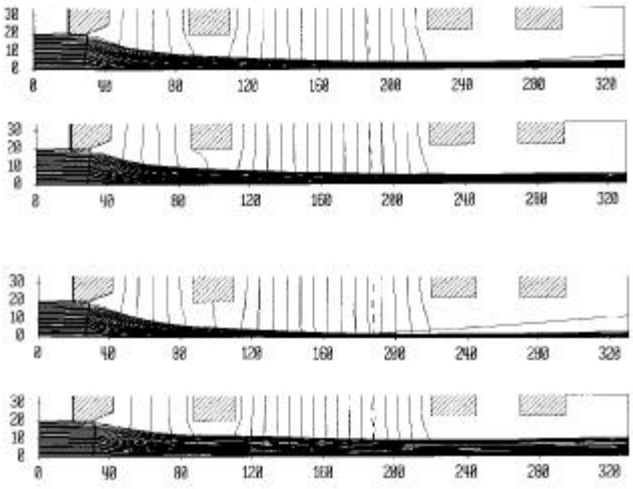


그림 12 가속 전극의 전압 리플에 따른 인출 빔의 특성

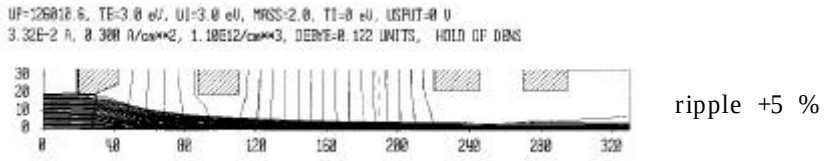
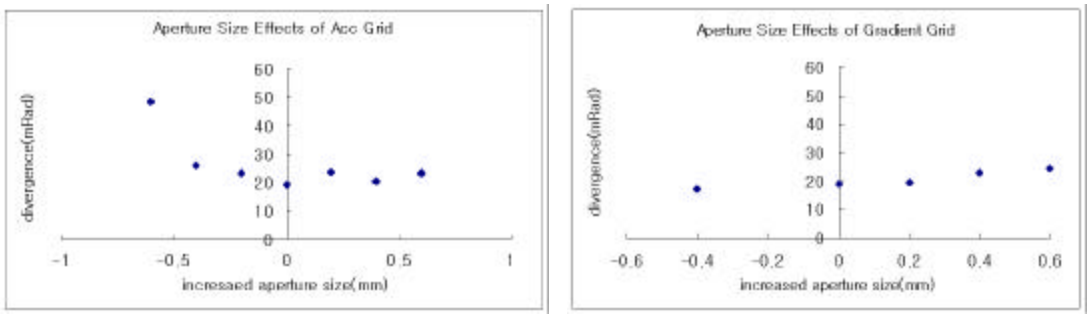


그림 13 가속전극과 gradient 전극에 동시에 5 %의 리플이 주어졌을 때 빔 인출 특성

(5) **인출구 가공 오차 및 감속전압에 따른 빔의 특성**

1000 개가 넘는 인출구를 하나씩 가공할 때 가공오차가 생길 수 있고 또한 가공 후에 전극들을 고정하는 과정에서 정렬오차도 생길 수 있다. 이러한 경우 오차를 얼마로 해야 할 것인 지에 대한 평가를 내리기 위해서는 오차에 따른 인출빔의 특성이 정확하게 파악되어야한다. 그림 14 (a)는 플라즈마 전극의 인출구 구경의 크기를 변화시킬 때 그에 따른 인출빔의 변화를 추적한 그래프이고, 그림 14 (b)는 gradient 전극의 구경을 변화시켰을 때의 결과들을 그래프로 나타낸 것이다. 그림에서 플라즈마 그리드의 가공이 매우 정확하게 이루어져야함을 알 수 있는데, 1 % 이내의 오차 내에서 가공이 이루어지면 발산각이 0.1° 이내에서 제어될 수 있음을 알았다. 전극들의 정렬오차에 대한 평가는 IGUN 프로그램[8]이 원형좌표계에서 축방향으로 비대칭인 경우에는 계산이 불가능하여 정확한 결과를 평가할 수 없었으나 인출구의 가공오차 데이터들로부터 비슷한 결과를 얻을 수 있음을 추정할 수 있다. 그림 15는 가속전극의 전압을 변화시킬 때 인출빔의 특성변화를 본 그래프인데, 감속전극의 전압은 120 kV 빔 인출의 경우 -5kV 까지 거의 영향이 없음을 알 수 있었다. 단 전자들의 궤적에는 영향을 미칠 수 있기 때문에 이에 대한 평가가 이론적으로 또는 실험적으로 필요하다.



(a) 플라즈마 전극 (b) 그리드 전극

그림 14 전극 구경의 가공오차에 따른 인출빔의 특성

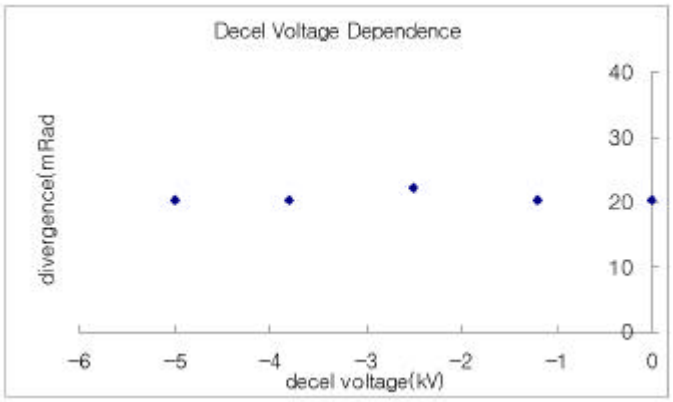


그림 15 감속전압의 변화에 따른 인출 빔의 특성

6. 결과 및 논의

이온원의 설계에 필요한 parameter 들을 일정한 규칙에 의하여 결정하고 그 결과들을 검증하는 작업을 수행하였는데, 설계 parameter들의 검증은 IGUN 프로그램을 사용하였다. 전반적으로 IGUN에 의한 빔인출 시뮬레이션 결과가 실제 실험결과와 정확하게 일치할 것이라는 보장은 없지만 몇 가지 parameter들의 변화에 따라 그 결과가 전체적으로 어떤 경향을 띠는 가를 유추할 수 있는 수단으로 설계에 이용될 수 있었다. 인출구의 형상은 가공비용과 그 효과를 검토한 결과 플라즈마 전극만 정확하게 형상가공을 수행하고 나머지 전극들은 드릴로 전극 판에 구멍을 가공하는 것만으로도 거의 비슷한 성능의 빔을 인출할 수 있는 것으로 나타났기 때문에 단순화한 설계를 최종안으로 확정하였다. 단 감속전극의 경우 전자들의 궤적이 어떻게 형성되는 가가 전극 설계에 영향을 주기 때문에 전극 형태에 따른 전자 궤적들을 검토해야할 필요성이 있다. 전극의 열해석은 열부하를 최악의 상태로 가정하고 수행한 결과 비정상적으로 열부하가 집중되는 현상이 발생하지 않는 한 정상적으로 장시간 운전하는 데 무리가 없는 것으로 계산되었다. 열해석 결과가 더 진행되어 전극의 변형에 의한 빔인출 특성이 파악될 수 있으면 좋은 설계자료가 될 수 있을 것이지만, 5장에서 수행한 인출구경의 가공오차에 의한 빔의 특성 결과로부터 유추하면 0.2 mm 이내의 변

형은 큰 문제를 일으키지 않을 것으로 판단된다.

설계에 필요한 기본 parameter들을 결정한 후 이보다 더 중요한 것은 이것들에 의해 실제 전극을 어떻게 제작하고 시험에 의해 검증을 수행하느냐하는 것이다. 다음은 전극들을 가공하고, 최종적으로 가공된 전극들로 가속부 전체를 제작하는 작업을 다음과 같은 기본 원칙 하에서 수행하려고 한다.

(1) 기존의 brazing 작업에 의해 냉각관을 배치시키는 작업대신 냉각관(내경 1.2 mm)을 super drill에 의해 전극 판에 직접 가공한다. 이러한 가공 방법에 의해 어려운 brazing을 피함으로서 제작 비용이 절감되고 표면 상태가 개선되어 high-voltage hold-off properties가 개선된다.

(2) 현재 제작된 slit 그리드의 냉각관 구조는 slit 내를 일일이 통과하는 냉각관 구조를 만들기 위해서 전극 전체를 지지하는 지지구조물에도 각 slit들과 연결될 냉각 체널을 만들어주어야 하는 복잡한 작업이 필요하나, 새로 제작하는 원형 전극의 냉각구조는 전극판 주변에 냉각수 manufolder를 배치시켜 지지구조물에까지 냉각관 관로들을 만들어야하는 복잡함을 없애고 단순화 시킨다. slit 전극 구조에서는 열팽창에 유동적이기 위해지지 구조에까지 독립적인 냉각관로가 필요하였지만 원형 인출구 전극인 경우 일체형으로 제작되기 때문에 단순화 시킬 수 있다.

(3) 냉각관로의 가공이 까다롭기 때문에 가공 실패 시 발생될 비용을 절감시키고, 유지보수 비용을 고려하여 13 x 45 cm^2 의 전극판을 4 쪽으로 나누어서 제작하는 데 우선 2 쪽을 먼저 제작하여 시험하고 나머지 2 쪽은 시험 결과를 보고 추가로 제작한다. 전극을 4쪽으로 나누어지는 구조로 제작함으로서 얻어지는 추가 장점은 온도에 의한 길이 방향 팽창 흡수 효과가 발생하고, 단점으로는 연결부에 의한 transparency가 감소된다.

(4) 그 외 가속부의 제작 시 전극과 insulator를 epoxy에 의해 접착시키는 데 접착면적을 늘여 접착력을 강화시키기 위해 절연 문제가 발생하지 않는 범위 내에서 접착표면을 요철구조를 가지도록 하는 방안과 bolting에 의한 체결 가능성을 검토 중에 있고, 전극간 코로나 방전을 막기 위한 전극의 배열 및 구조를 구성 중에 있다.

7. 결론

120 kV, 65 A 빔을 인출하기 위한 원형 그리드를 설계하였다. 가속전극들의 두께는 플라즈마 및 gradient 전극의 경우 2.2 mm, 나머지 전극들은 2.5 mm로, 인출구의 직경은 플라즈마 전극만 4 mm, 나머지 전극들은 4.4 mm로 설계하였다. 전극 간의 거리는 플라즈마 전극과 gradient 전극간은 4.5 mm, gradient 전극과 감속전극간은 11 mm, 감속전극과 접지 전극 간은 2.5 mm로 설계하였고, 전극간 절연체의 길이는 플라즈마 전극과 gradient 전극간은 55 mm, gradient 전극과 감속전극간은 125 mm, 감속전극과 접지 전극 간은 30 mm로 설계하였다. 인출구의 형상은 가능한 한 단순화 시킨 구조로 설계를 하였는데 플라즈마 전극만 제외하고 형상 가공을 하지 않더라도 만족스러운 빔인출을 얻을 수 있을 것으로 판단되었다. 장시간 운전을 위해 필요한 전극의 냉각을 위해 1.2 mm 관을 전극 인출구의 주변에 설치하고, 냉각 능력을 검토한 결과 냉각수의 유량이 6m/sec 이상이면 무산소동으로 된 전극은 최대온도 250 °C 이내에서 온도 유지가 가능하고, 이때 관속을 흐르는 냉각수 온도의 상승은 최대 50 °C 이내로 유지가 가능하여 충분한 제열 능력을 가질 수 있음을 확인하였다. 또한 최종 설계된 전극 구조에 의해 플라즈마 parameter 들의 변화에 따른 운전대책들과, 가공오차 및 전원 리플에 의한 빔 인출 특성을 파악하여 가공 오차 1 %, 전원 리

플 2 % 이내에서 제작이 이루어질 경우 빔 발산각 변화 0.1° 이내에서 운전이 가능함을 알았고, 플라즈마 그리드의 형상 및 인출구 가공의 오차가 빔인출 특성에 가장 큰 영향을 주는 것을 알 수 있었다.

참고문헌

[1] Equipe TFR, "Tokamak Plasma Diagnostics ; Review Paper", Nucl. Fusion, 18, **647** (1978)

[2] The KSTAR Team, in IAEA-F1-CN-69/FT1/1, 17th IAEA, Fusion Energy Conference, Yokohama, Japan.

[3] B.H. Oh, K.R. Kim, and B. H. Choi, Rev. Sci. Instrum., **71**, 1 (2000)

[4] 石川順三, "이온원 工學", p. 1, 아이오닉스 주식회사 (1986)

[5] Mikito Kawai et. al., "Increase of the Positive Ion Source Powers in JT-60 NBI", JAERI-Tech 98-042

[6] L.R. Grisham, C.C. Tsai, J.H. Whealton, and W.L. Stirling, Rev. Sci. Instrum., **48**, 1037 (1977)

[7] ANSYS, Inc. , PA 15342-1300, ANSYS Code Manual

[8] W.B. Herrmannsfeldt, and Reinard Becker, IGUN Code Manual