‘2000 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

고전력 장펄스의 ICH 안테나 개발

Development of High Power and Long Pulse ICH Antenna

배영덕, 황철규, 홍봉근

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

유현종

한양대학교
서울특별시 성동구 행당동 17

요 약

KSTAR(Korea Superconducting Tokamak Advanced Research, 국가핵융합연구장치)의 플라즈마 가열 및 전류구동을 위해 6 MW급 ICH(Ion Cyclotron Heating) 계통의 안테나에 대한 공학설계를 수행하였으며, proto-type 안테나를 국내 제작하였다. 안테나의 주요 구성은, 양쪽 끝에 6", 40Ω 진공전송선이 연결된 중심 접지형 4개의 전류띠, 단일층 파라데이 차폐체, 4분할 공동으로 이루어져 있으며, KSTAR 진공용기의 주수평포트에 삽입되는 구조이다. 전체 안테나 계통은 진공 중에서 토카막의 주반경 방향으로 10 cm 이동할 수 있다. 300초 운전을 위해 전류띠, 파라데이 차폐체, 공동벽 및 진공전송선에 냉각관로를 내장하였으며, 순수에 의한 강제냉각을 통해 고주파 및 플라즈마로부터의 최대 0.5 MW/m^2 열부하를 제거할 수 있도록 하였다. 제작된 안테나에 대해 각각의 냉각관로에 대한 유량을 측정하였으며, 진공 중에서 기계적 시험을 완료하였다.

Abstract

Engineering design of 6 MW ICH(Ion Cyclotron Heating) system for the plasma heating and current drive in KSTAR(Korea Superconducting Tokamak Advanced Research) tokamak is carried out and a proto-type antenna is domestically fabricated. The antenna is mainly composed of center-grounded 4 current straps connected with 6"-, 40Ω-VTL(Vacuum Transmission Line) on both ends, single-layer Faraday shield and 4-section cavity, forming a plug-in type to be inserted from the horizontal port of KSTAR vacuum vessel. With the machine under vacuum, the

launcher changes its radial position up to 10 cm from the innermost position. For 300 sec operation, the antenna has many cooling channels inside the current straps, Faraday shield, cavity wall and VTLs, and it is actively cooled with demineralized and deionized water to remove the dissipated RF loss power and incoming plasma heat load of 0.5 MW/m^2 max. Flow rate of cooling water in each coolant path is measured and mechanical test is performed.

1. 서 론

KSTAR(Korea Superconducting Tokamak Advanced Research, 국가핵융합연구장치)[1]는 차세대 초전도 토카막으로서, 주반경 R=1.8m, 부반경 a=0.5m, 연신율(elongation) κ=2, 삼각도(triangularity) δ=0.8, 토로이달 자장 B_T=3.5T, 플라즈마 전류 I_P=2MA이다. KSTAR 토카막의 플라즈마 지속시간은 300초에 이르며, 정상상태에서의 차세대 토카막 플라즈마를 연구할 수 있도록 설계되었다.

ICH(Ion Cyclotron Heating)계통[2]은 KSTAR의 보조 가열장치 중의 하나로서, 플라즈마에 6 MW의 고주파 전력을 공급하게 되며, 안테나는 KSTAR 진공용기의 주 수평포트에 설치된다(upgrade시 인접한 2개의 포트를 통해 12 MW 공급). 공급되는 고주파 전력의 주파수 영역은 25 60 MHz로서 토로이달 자장이나 목적에 따라 가변할 수 있어야 하며, 운전 중에 전류구동의 효율을 변화시키기 위해 전류띠간의 위상차이도 변화시킬 수 있어야 한다. 본 ICH계통의 역할은 토카막 플라즈마내의 이온 가열, 중심축에서의 전류 구동 및 모드 변환을 통한 중심축 바깥에서의 전류 구동이다. 이러한 요구 조건을 고려하여 KSTAR의 플라즈마 특성, 진공용기의 구조, 내벽 구조물의 형상 등을 고려하여 ICH 안테나를 설계하였으며, proto-type 안테나를 국내 제작하였다. 기존의 대형 토카막 장치들은 대부분 펄스 운전형으로서 ICH 안테나의 냉각문제를 크게 고려하지 않고 있으나, KSTAR의 경우 연속 운전을 위한 연구가 주목적이므로 본 ICH 안테나의 경우 충분한 냉각 능력을 갖도록 하였다. 제작된 안테나는 9.9 MW/m^2의 높은 전력 밀도와 300 sec의 장시간 운전이 가능하도록 모든 구성 요소를 강제 냉각할 수 있도록 하였다. 본 논문에서는 이러한 안테나 제작을 위한 상세 공학설계 및 proto-type 안테나의 제작 내용과 제작된 안테나에 대한 기초적인 시험 결과에 대해 서술하였다.

2. ICH 안테나 공학 설계 및 제작

ICH 안테나 계통은 KSTAR 진공용기의 주 수평포트(748.2mm×1200mm)에 설치되며, 플라즈마로 6 MW의 고주파 전력을 공급할 수 있도록 설계하였으며, 이를 바탕으로 proto-type 안테나를 국내 제작하였다. Proto-type 안테나는 본제품에서 적용할 파라데이 차폐체의 재료 및 지지구조에 대한 설계를 제외한 나머지 모든 사양은 본제품과 동일하며, 설계, 제작된 안테나는 **Fig. 1**과 같으며 주요 사양은 **Table 1**과 같다.

안테나의 주요 구성은, 양쪽 끝에 진공전송선이 연결된 중심 접지형 4개의 전류띠(current strap), 단일층 파라데이 차폐관(mono-layered Faraday shield tube), 4분할 공동(4-section cavity)으로 이루어져 있으며, KSTAR 진공용기의 주수평포트에 삽입되는

구조이다. 진공용기내에서 파라데이 차폐체의 전방 표면은 표준 플라즈마 표면으로부터 +2 cm에 위치하며, 진공 상태에서 그 위치를 10 cm 바깥쪽으로 이동할 수 있다. 300초 운전을 위해 전류띠, 파라데이 차폐체, 공동벽 및 진공전송선에 냉각관로를 내장하였으며, 순수에 의한 강제냉각을 통해 고주파 및 플라즈마로부터의 최대 0.5 MW/m^2 열부하를 제거할 수 있도록 하였다.

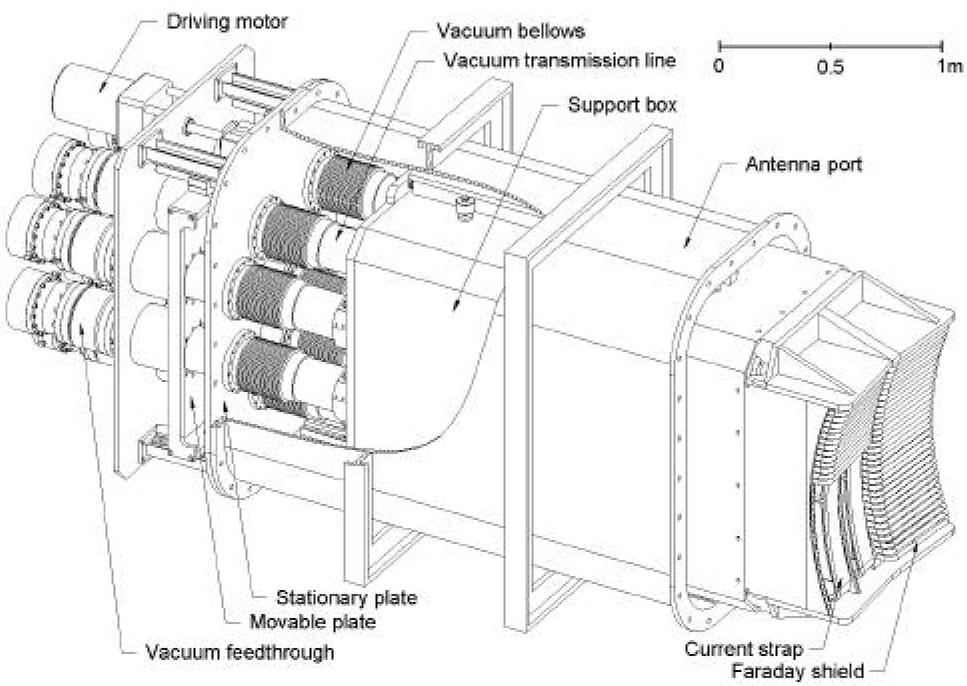

Fig. 1. ICH antenna system for KSTAR.

안테나의 전류띠는 전류구동을 위해 4개로 이루어져 있으며, 토로이달 방향으로 167 mm 또는 198 mm 간격으로 공동(cavity box) 속에 설치되어 있다. 4칸으로 나누어진 공동의 각각의 칸 속에 들어 있는 전류띠 간의 상호유도 효과는 전류띠간의 전력 전달을 결정하는 요소로서, 전력 제어의 용이성을 위해 인접한 전류띠간에는 거의 같은 값을 가지도록 설계하였다. 설계된 안테나에 대해 주어진 경계 조건에 대해 전장과 자장 분포를 계산하여 전류띠의 전기적 특성을 구하였으며 그 결과는 **Table 2**와 같다. 최대로 전력을 전달하기 위해 전류띠의 중간 부분을 접지하였으며, 양쪽 끝에는 특성 임피던스가 40 Ω인 6" 진공전송선의 중심도체와 연결된다. 전류띠의 중간 접지 기둥은 공동(cavity box)의 뒷판에 고정되며, 전류띠 전체를 기계적으로 지지하며, 냉각수의 인입 통로 역할을 한다. 전류띠의 폴로이달 방향으로의 구조는 KSTAR 플라즈마의 표면과 일정한 간격으로 인접하게 하기 위해 플라즈마쪽 표면의 곡률 반경을 1100 mm로 하였다. 토로이달 방향으로는 좌우 2개씩의 전류띠를 대칭으로 171° 각도로 배치된다. 전류띠의 재료는 SUS316L이며, 고주파에 의한 저항 손실을 줄이기 위해 표면은 20 μm 두께로 Cu 도금

Table 1. Characteristics of ICH antenna for KSTAR

Maximum RF power :	6 MW
Pulse duration :	300 sec
Frequency range :	25 60 MHz
Maximum allowable voltage :	35 kV
Type :	plug-in type
Current straps	
number :	4
type :	center-grounded
material :	Cu-plated SUS316L
size :	752mmH×98mmW
strap cooling :	water cooling
Faraday shield	
type :	mon-layered tube type
	2 sections, 33 tubes/section
material :	Inconel 625
surface treatment :	Cu-plated and B_4C-coated
(proto-type antenna : Cu-plated SUS316L)	
tube cooling :	water cooling
Cavity box :	4 sections
material :	SUS316L
wall cooling :	water cooling
Vacuum transmission line	
number :	8
size :	6"
characteristic impedance :	40 Ω
material :	Cu-plated SUS304
cooling :	water-cooled center conductor
Radial stroke :	100 mm

Table 2. Electric circuit parameters of the current straps.

Electrical parameters		Values
Inductance, $L[10^{-7}H/m]$	outer strap	2.56
	inner strap	2.59
Mutual coupling coefficient, k[%]	k_{12} ($=k_{34}$)	7.98
	k_{23}	7.85
	k_{13}	1.62
	k_{14}	0.49
Effective capacitance, $C_{eff}[10^{-10}F/m]$	outer strap	1.17
	inner strap	1.17
Characteristic impedance, $Z_0[\Omega]$	outer strap	46.7
	inner strap	47.0
Relative phase velocity, $\beta = v_p/c$	outer strap	0.609
	inner strap	0.605

하였다. 전류띠에 가해지는 열부하는 플라즈마로부터 28 kW/m^{2}와 고주파 전류에 의한 저항열부하 40 kW/m^{2}가 있다. 이러한 열부하에 대해 전류띠를 냉각시키기 위해 전류띠의 양쪽 모서리를 따라 직경 12 mm의 냉각수 통로를 조성하였으며, 접지 기둥을 통해 냉각수가 공급되도록 하였다. ANSYS 코드를 이용하여 열해석을 수행한 결과,[3] 냉각수 유속이 1.125 m/sec, 입구 온도 40 ℃일 때 플라즈마쪽 면에서의 최고 온도가 130 ℃이었으며, 냉각수의 최고 온도는 54 ℃이었다. 열응력은 냉각통로 근처에서 최대였으며, 그 값은 53 MPa로서 허용 열응력보다 매우 작은 값이다.[3]

파라데이 차폐체는 안테나가 플라즈마에 직접적으로 노출되는 것을 막아 안테나를 보호하고, 안테나로부터 방출되는 전자기파의 전장 성분 중에서 토로이달 방향에 평행인 전장성분을 차폐하는 역할을 한다. 파라데이 차폐체는 고주파 자체와 플라즈마로부터 가해지는 최대 0.5 MW/m^{2}의 열부하를 300초 동안 견딜 수 있어야 하며, 온도 상승 및 차이로 인한 열응력을 지탱할 수 있어야 한다. 이러한 열부하 조건을 고려하여 파라데이 차폐체로는 내경 13.4 mm, 외경 15.9 mm(5/8")의 Inconel 625 관을 선택하였으며, 내부로 냉각수가 흐르게 하였다. 설계된 파라데이 차폐관에 대한 열해석 결과, 주어진 열부하에 대해 냉각수 유속 2 m/sec, 입구 온도 40 ℃일 때 최대 표면 온도는 149 ℃, 최대 응력은 160 MPa이었다. Inconel 625의 항복응력(yield stress)이 252 MPa, 허용 열응력은 756 MPa이므로 재료의 강도는 충분하다. 또한 플라즈마 disruption시의 응력을 계산해보면 최대 40 MPa로서 충분히 견딜 수 있음을 알 수 있었다.[3] 파라데이 차폐체의 토로이달 자장과의 설치 각도가 미치는 영향에 대해서는 세계의 여러 토카막을 이용한 다수의 연구와 논의가 있었으나 결론에는 도달하지 못하고 있다.[4,5] 본 안테나에서는 제작의 용이성을 고려하여 자장의 각도를 고려하지 않고 수평으로 설치하였다. 공동의 좌우 sections에는 각각 33개씩의 파라데이 차폐관이 설치되어 있는데, 토로이달 방향으로 보아 두 sections은 171° 각도를 이룬다. 공동의 한 section에 대해 폴로이달 방향으로의 차폐관 설치 구조는 차폐관의 플라즈마 쪽 표면이 R=1100 mm 원주 상에 위치하도록 하였다. 이러한 설치 구조는 ICH 계통의 위치를 고정하였을 때, 4개의 전류띠와 플라즈마와의 거리를 최소화하여 플라즈마 부하 저항을 최대화함으로서 고주파 전력 전달을 극대화할 수 있다. 모든 안테나 계통을 조립 완료하였을 때, 파라데이 차폐관들이 이루는 플라즈마쪽 표면의 정확도는 ±1 mm 이내로 하였다.[6]

파라데이 차폐관의 표면은 저항 손실을 줄이기 위해 Cu로 도금하며, 플라즈마를 향한 표면은 높은 원자번호 물질에 의한 불순물 영향을 줄이기 위해 Cu 도금 위에 0.1 mm 두께의 B_4C를 진공 플라즈마 용사법에 의해 증착하게 된다. B_4C를 증착하는 기술이 국내에서는 아직 시도된 바 없으므로, proto-type 안테나 제작에서는 파라데이 차폐관 재료로서 SUS316L을 사용하였다. Inconel 625 관에 B_4C를 증착하는 방법에 대한 연구는 Inconel 625 관으로 시험 시편을 제작하여 수행하고 있으며, 접합강도 및 열부하 시험을 계획하고 있다.

공동의 상, 하, 좌, 우 벽과 septum plate는 모두 내부에 냉각 통로를 지니고 있으며, 벽뒷판은 안쪽으로는 전류띠의 중간 접지 기둥이 고정되며, 뒷면에는 8개의 진공전송선의 외부도체관이 접속되게 하였다. 또한 2개의 냉각수 인입/분배기도 뒷면에 고정된다. 공동의 좌, 우, 상, 하 및 septum plate는 용접을 하며, 전류띠가 설치되는 뒷판은 볼트

에 의해 분해, 조립이 가능하도록 하였다. 공동의 좌, 우 판과 뒷판의 아래, 위에 있는 brackets를 통해 지지구조체와 접속된다.

전류띠의 양쪽 끝에 연결된 진공 전송선은 KSTAR 진공용기의 외부까지 연장되어 있고, vacuum feedthrough와 movable section을 통해 가압 전송선과 연결된다. 상, 하의 가압 전송선은 각각 한 개씩의 위상가변기(phase shifter)를 거쳐 공명 회로를 이루며, T형 연결부를 통해 2 MW급 고주파 전력 공급원으로 연결된다. 전류띠의 중간이 접지되어 있기 때문에 고주파 전압의 최대 지점이 본 ICH 계통의 모든 사용 주파수에 대해 Fig. 2에서 보는 바와 같이 진공전송선로 상에 있게 된다.

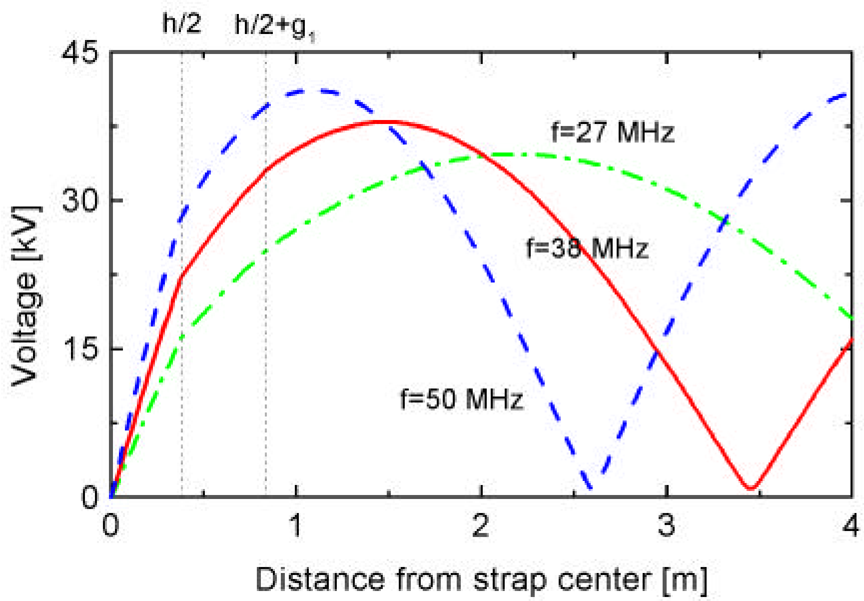

Fig. 2. Voltage distribution along the current strap(length, h), feeder(length, g_1) and vacuum transmission line.

따라서 진공전송선 설계에 있어서 절연 파괴 문제가 가장 큰 고려의 대상이다. 진공전송선로상에서의 최대 전압은 진공전송선의 특성 임피던스에 의해 좌우되며, 특성 임피던스는

$$Z_0 = 60\,\ell n\left[\frac{r_o}{r_i}\right] \tag{1}$$

와 같이 전송선의 외부 도체관의 내경 r_o와 중심 도체관의 외경 r_i에 의해 결정된다. 절연 파괴를 결정하게 되는 전장의 세기도 도체관의 크기에 의해

$$E_{max} = \frac{V_{max}}{r_i\,\ell n\left[\frac{r_o}{r_i}\right]} \tag{2}$$

와 같이 결정된다. 본 ICH 계통에서 진공전송선의 외부 도체의 크기는 KSTAR 진공용기와 안테나의 공동 크기에 의해 외경 150 mm, 내경 146 mm의 상용 SUS304 tube로

하였다. 이 경우에 대해 사용 주파수가 f=50 MHz일 때 중심 도체의 외경에 따른 특성 임피던스와 접지점에서 I=1 kA일 때의 최대전압, 최대 전장을 **Fig. 3**에 보이고 있다. 그림으로부터 알 수 있듯이 중심 도체의 직경이 증가하면 특성 임피던스가 작아져서 진공전송선로상의 최대 전압이 감소하게 되지만 최대 전장의 세기는 r_i=32 mm 이상에서는 외부 도체와의 거리가 가까워짐에 따라 다시 증가하게 된다. 전장의 세기는 r_i=24 40 mm 영역에서는 거의 같은 값으로 낮게 유지되고 있다. 따라서 중심 도체는 상용 3" SUS304 tube로 결정하였으며, 이 경우 특성 임피던스는 Z_0=39 Ω이 된다. 진공전송선의 재료로서 SUS304를 선택한 이유는 기계적 특성이 Cu에 비해 우수하기 때문이며, 전기전도도를 향상시키기 위해 고주파 전류가 흐르는 표면은 Cu로 도금하였다.

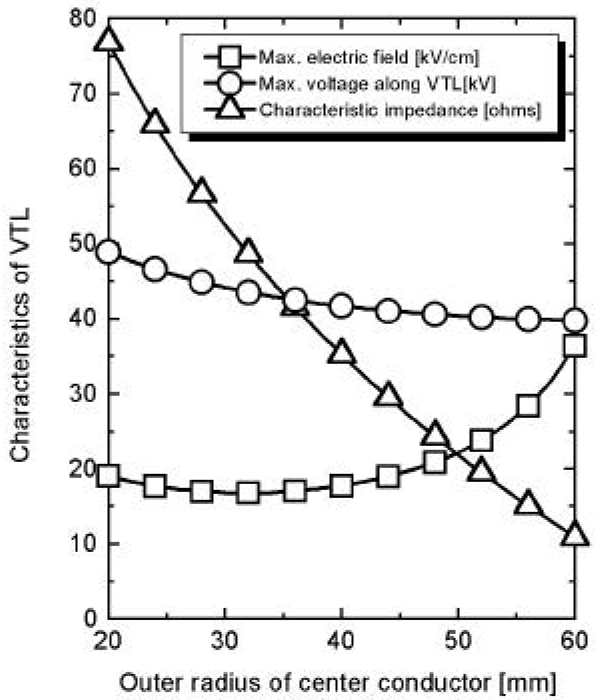

Fig. 3. Electrical characteristics of VTL.

진공전송선에서의 온도 상승은

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -k\nabla^2 q + h/C_p \qquad (3)$$

와 같은 lumped heat conduction equation으로부터 예측할 수 있다. 보수적으로 고려하기 위해 열전도에 의한 열 이동을 무시하고 냉각을 하지 않는 경우, 온도 상승 $\triangle T$는

$$\triangle T = \frac{h}{C_p}\triangle t \qquad (4)$$

가 된다. 이 식에서 열의 발생부분은 표면에 도금한 Cu 부분이며, 이 열은 도체 물질인 SUS304의 온도를 상승시킨다. 따라서 C_p는 SUS304의 열용량으로서 477 $JK^{-1}kg^{-1}$이며, 중심 도체의 해당되는 무게는 $M=2\pi r_i t L\rho=2\pi\times3.81\times0.165\times227.5\times7.93=7.13\times10^3$ g이다. h는 단위 시간당, 단위 질량당 발생열이다. h는 skin effect를 고려한 동축 전송선의 저항 R로부터

$$P_{loss} = \frac{R}{R+Z_0}P_{RF} \qquad (5)$$

와 같다. 여기서 저항 R은 단위 길이당 저항 R'에 길이를 곱하여 구할 수 있으며, 본 진공전송선의 특성 임피던스는 Z_0=39 Ω이며, P_{RF}=1 MW이다. 동축 전송선의 경우 단위 길이당 저항 R'은

$$R' = \frac{R_s}{2\pi}\left[\frac{1}{r_o} + \frac{1}{r_i}\right][\Omega/m] \quad (6)$$

이며,[7] 여기서 R_s는 skin effect surface resistivity로서 Cu의 경우

$$R_s = 2.61\times 10^{-7} f^{1/2} \ [\Omega] \quad (7)$$

이다.[7] 따라서 주파수 f=50 MHz의 고주파 1 MW를 300초 동안 전송하는 경우, R_s=0.0018 Ω, R'=0.012 Ω/m, R=0.027 Ω, P_{loss}=687 W, h=96.4 J/s·kg이므로 진공전송선에서의 열 발생으로 인한 온도 상승을 계산하면 △T=60.6 ℃이다. 이러한 온도 상승은 진공전송선의 중심 도체의 열팽창을 유발하며, vacuum feedthrough와 연결된 끝 부분이 고정되어 있으므로 전류띠 위치에서 플라즈마쪽으로 2.5 mm의 위치 이동이 발생한다. 이를 방지하기 위해 중심도체의 내부에 Fig. 4와 같이 냉각통로를 설치하여, 발생하는 열을 제거하도록 하였다. 냉각통로는 전류띠로부터 가운데 관 속으로 인입된 냉각수가 진공전송선 끝에서 두 관 사이로 돌아 다시 전류띠로 돌아갈 수 있는 구조이다. 전류띠와 연결되는 부분(Detail A)에는 전류띠의 크기에 맞도록 직경 98 mm로 확장되어 있으며, 두 개의 냉각통로가 있다. 냉각통로는 Viton O-ring으로 밀폐하였다. Vacuum feedthrough와 연결되는 부분은 Detail B와 같이 unflanged connector를 끼울 수 있도록 하였다. 전체 ICH 계통을 진공 상태에서 이동 가능하도록 하기 위해 진공전송선 외부 도체의 바깥쪽 면에 vacuum bellows의 한쪽 끝을 용접하였으며, 다른 한쪽에는 flange를 부착하여 stationary plate에 고정되도록 하였다. Bellows의 stroke는 100 mm이다.

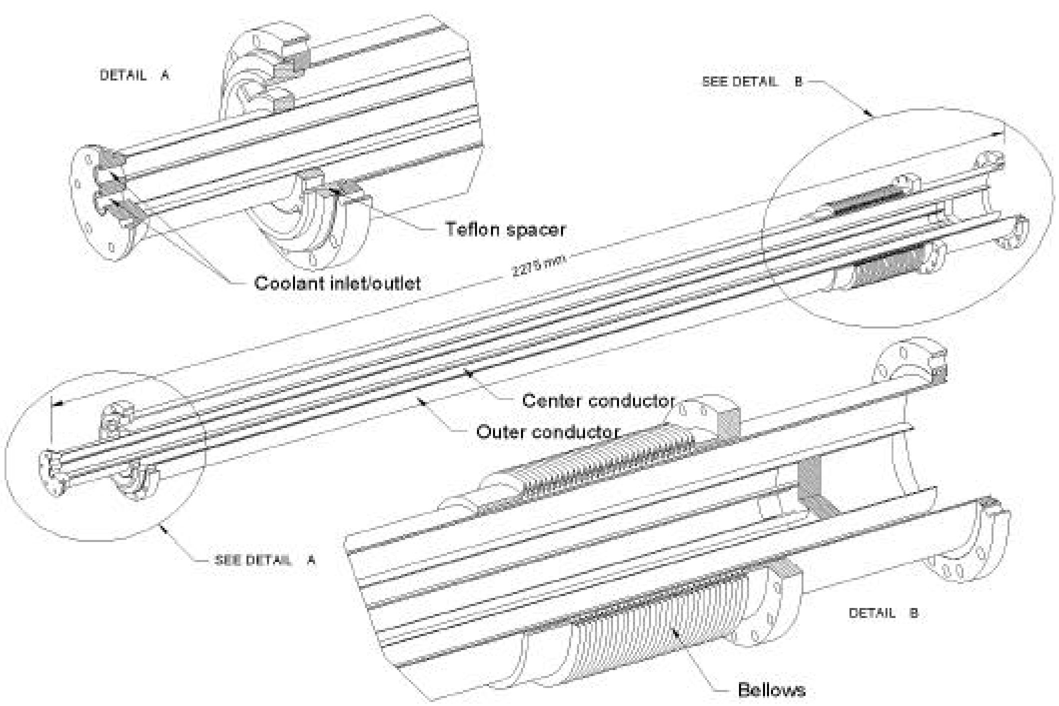

Fig. 4. Detail view of the VTL(Vacuum Transmission Line).

4개의 전류띠와 8개의 진공전송선은 공동에 설치되며, 공동은 다시 support box에 연결된다. 진공전송선의 다른 한쪽도 support box의 바깥쪽에 위치의 미세조정이 가능한 holder에 의해 고정된다. 따라서 모든 하중은 support box에 전달되며, support box를 포함한 전체 하중은 1.5 ton이며, 그 무게 중심은 support box의 앞쪽에서부터 안쪽으로 60 cm 지점에 있다. Support box의 아래 판에는 4개의 roller가 설치되어 있으며, 윗 판에는 guide roller를 부착하였다. 이는 KSTAR 진공용기의 안테나 포트에 삽입, 이송을 위한 것이다. 안테나 전체가 조립된 상태에서 support box는 진공상태에서 bellows와 구동부에 의해 100 mm 이동이 가능하다. 본 proto-type 안테나에서는 안테나의 전체 하중이 최종적으로 안테나 포트의 rail를 통해 포트에 전달되도록 하였으며, 수직 방향으로는 단순히 자체 하중에 의해 고정되며, 플라즈마 disruption 등과 같은 경우 발생하는 회전력 경우, 포트 상단의 guide rail에 의해 지지되도록 하였다. 안테나 이송용 전동기가 진공에 의해 받는 힘은 2.3 ton이다. 구동용 전동기로는 최대 토크 30.4 N·m의 servo motor를 사용하였으며, 감속기(기어비 17:1)를 통해 구동축과 연결하였다. Servo motor는 PLC로 제어하도록 하였다.

ICH 계통에서 냉각이 요구되는 것은 전류띠, 파라데이 차폐체, 안테나 공동, 진공전송선의 중심 도체 등이며, 이들에 대한 냉각수 순환도는 **Fig. 5**와 같다. 전체 냉각수는 외부로부터 Stationary plate에 용접되어 있는 coolant feeder를 통해 끝에 bellows가 연결되어 있는 직경 73 mm의 주 냉각관로에 의해 공급된다. 주 냉각관로는 위에서 설명한 support box에 의해 지지된다. Bellows의 stroke는 진공전송선용 vacuum bellows와 마찬가지로 100 mm이다. 안테나 구성품 중에서 가장 열부하가 높은 파라데이 차폐체는 냉각을 용이하게 하기 위해 관으로 제작하였으며, 주냉각관 끝에 연결된 inlet manifold로부터 3개의 1" 관을 이용해서 공동의 우측벽의 coolant inlet에 연결된다. 3개의 inlet은 wall 내부의 water jacket로 연결되어 있으며, 이 water jacket으로부터 33개의 파라데이 차폐관이 병렬로 연결되어 있다. 각 차폐관의 반대쪽은 inner wall에 연결되어 있으며, inner wall 속에는 각각의 차폐관에 대해 독립적으로 'U'자형 냉각통로가 있다. 이 통로의 끝에는 공동의 인접 section을 감싸고 있는 33개의 파라데이 차폐관으로 각각 연결되어 있다. 다시 이 차폐관들은 좌측벽 속의 water jacket를 통해 빠져 나오게 된다. 즉, 파라데이 차폐관의 냉각관로는 2개씩 직렬로 된 33개의 병렬 연결이다. 전류띠의 냉각관로는 양쪽 모서리를 따라 직경 12 mm의 냉각관로를 구성하였으며, 중앙의 접지 기둥을 통해 coolant manifold와 연결되어 있다. 즉, inlet manifold로부터 접지 기둥의 한쪽으로 들어온 냉각수는 전류띠와의 연결부에서 'T'자형으로 나누어진 다음 전류띠를 거쳐 양쪽 끝에 연결된 진공전송선의 중심 도체로 연결된다. 진공전송선의 냉각관로는 4절에서 설명한 바와 같으며, 진공전송선을 거쳐 나온 냉각수는 다시 전류띠의 다른 한쪽 모서리를 거쳐 접지 기둥을 통해 밖으로 나오게 된다. 이와 같이 진공전송선의 냉각관로를 독립적으로 형성하지 않고 전류띠의 냉각관로와 연결한 것은 진공전송선의 접지측으로 통하는 냉각관로를 독립적으로 형성하기가 어렵기 때문이다. 이 냉각관로의 총 길이는 6.3 m이다. 공동(cavity box)의 각각의 wall은 coolant manifold와 직경 12 mm 관으로 각각 독립적으로 연결되어 있다.

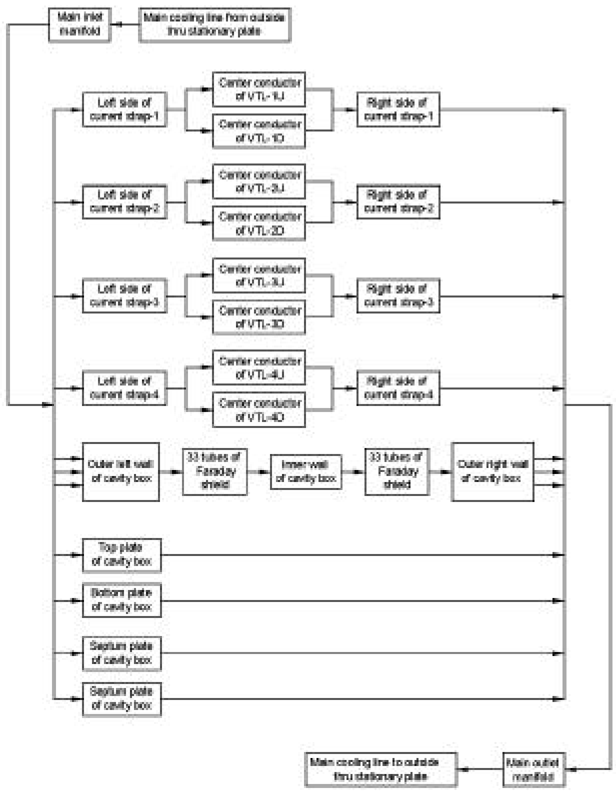

Fig. 5. Coolant paths of the ICH antenna.

3. 결과 및 결론

제작된 안테나는 Fig. 6과 같다. 본 안테나의 중요한 특성의 하나인 냉각 능력을 평가하기 위해 각 관로의 유량을 측정하였다. 우선 전체 냉각관로에 대해 유량을 측정한 결과, 입구측 압력 35.9 psi, 출구측 압력 5.3 psi에 대해 303 ℓ/min의 유량을 얻었으며, 이는 본제품에서의 사용 압력 150 psi에 대해 약 600 ℓ/min의 유량을 얻을 수 있음을 나타내므로 요구조건을 만족하는 충분한 유량이다. 전류띠에 흐르는 유량은 한 개당 38.4 ℓ/min이며, 유속은 1.21 m/sec로서 요구조건(1.1 m/sec)을 만족하고 있다. 공동의 상, 하 판에는 13.7 ℓ/min, 그리고 Septum plate에는 18.1 ℓ/min으로 측정되었다. 공동의 좌, 우측 판을 통해 33개의 파라데이 차폐관으로 흐르는 각각의 유량을 초음파 유량계(CONTROLOTRON System 1010)를 이용하여 측정한 결과, 각각의 차폐관에 흐르는 유량이 거의 일정함을 확인하였으며, 평균 유속이 0.44 m/sec, 유량은 3.7 ℓ/min으로 측정되었다. 이로부터 본제품에서의 사용 압력 150 psi하에서는 0.9 m/sec의 유속을 얻을 수 있음을 알 수 있으며, 이는 요구 조건(2 m/sec)에 미치지 못하는 바, 유량이 충분한 타 관로의 냉각수를 파라데이 차폐관으로 재분배하는 관로 개선이 요구된다.

진공 중에서 전체 안테나 계통의 위치 이동 계통을 시험한 결과, 위치 이동 속도 4 mm/sec를 얻었으며, 위치 설정의 재현성 및 정확도는 ± 0.1 mm 이하로 측정되었다. 이는 요구되는 정확도(± 1 mm)를 충분히 만족시키고 있다.

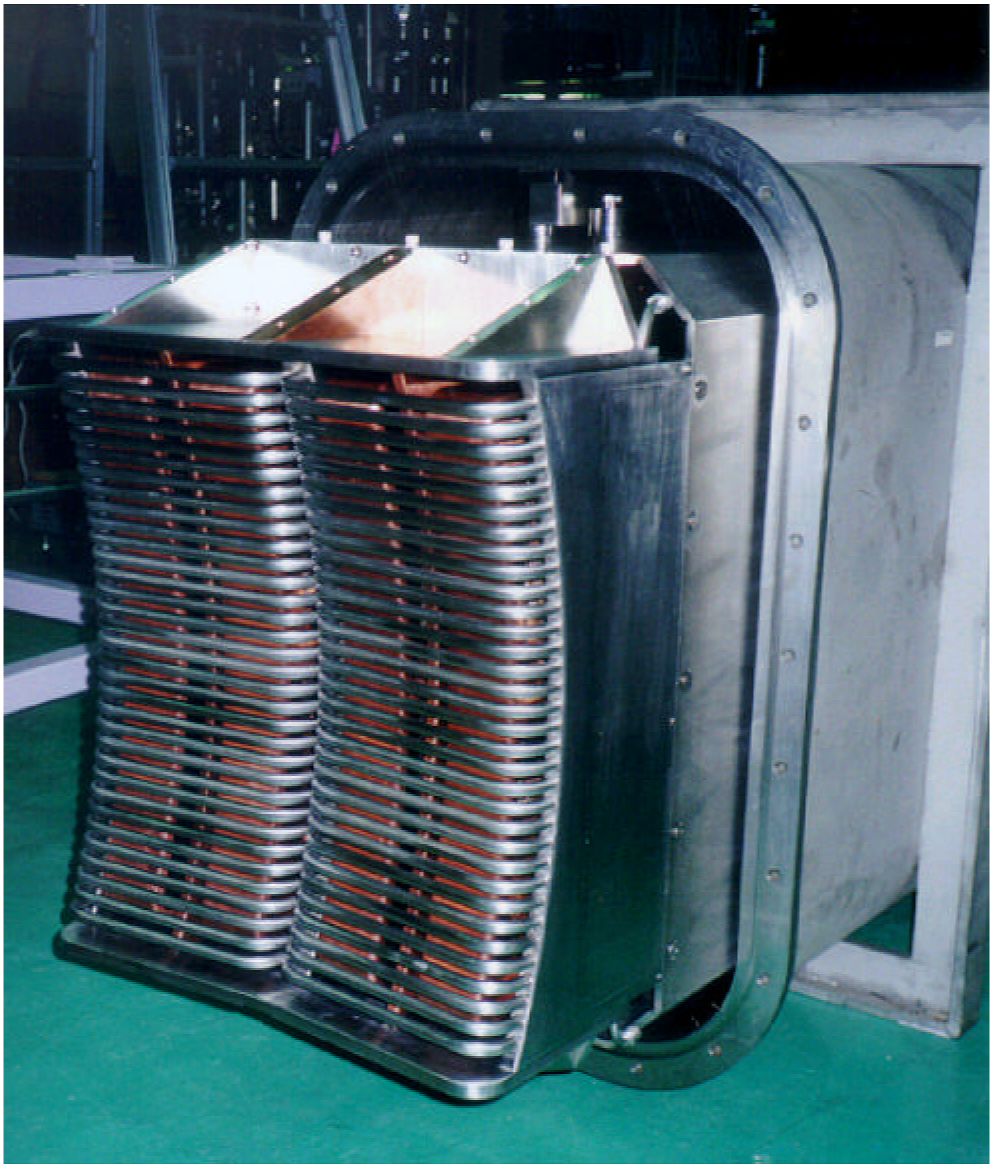

Fig. 6. Front view of the fabricated proto-type ICH antenna.

제작된 안테나에 대한 진공 특성, 진공중에서의 고전압 및 고전류 특성, 그리고 multipactoring discharge 현상을 시험하기 위해[8] **Fig. 7**과 같이 시험 용기를 설계, 제작하였다. 시험용 진공용기는 본 ICH 안테나가 설치될 KSTAR 토카막의 진공용기를 모사한 것이며, 1600 ℓ/s의 배기속도를 가진 Turbomolecular Drag Pump에 의해 배기된다. 또한 전류 및 전압 탐침, thermocouple 등의 진단계통을 설치하였다. 230 kA·Turns의 전자석을 설치할 예정이며, 이 경우 안테나 영역에서 930 Gauss 이상의 자장을 형성시킬 수 있다.

결론적으로 KSTAR(Korea Superconducting Tokamak Advanced Research, 국가핵융합연구장치)의 플라즈마 가열 및 전류구동를 위해 6 MW급 ICH(Ion Cyclotron Heating)

계통의 안테나에 대한 공학설계를 성공적으로 수행하였으며, 이를 바탕으로 proto-type 안테나를 국내 제작하였다. 제작과정에서 국내의 제작 여건과 재료 수급 가능성을 공학설계에 반영하였다. 이로서 고출력 ICH 안테나의 국내 제작 가능성을 확인하였다.

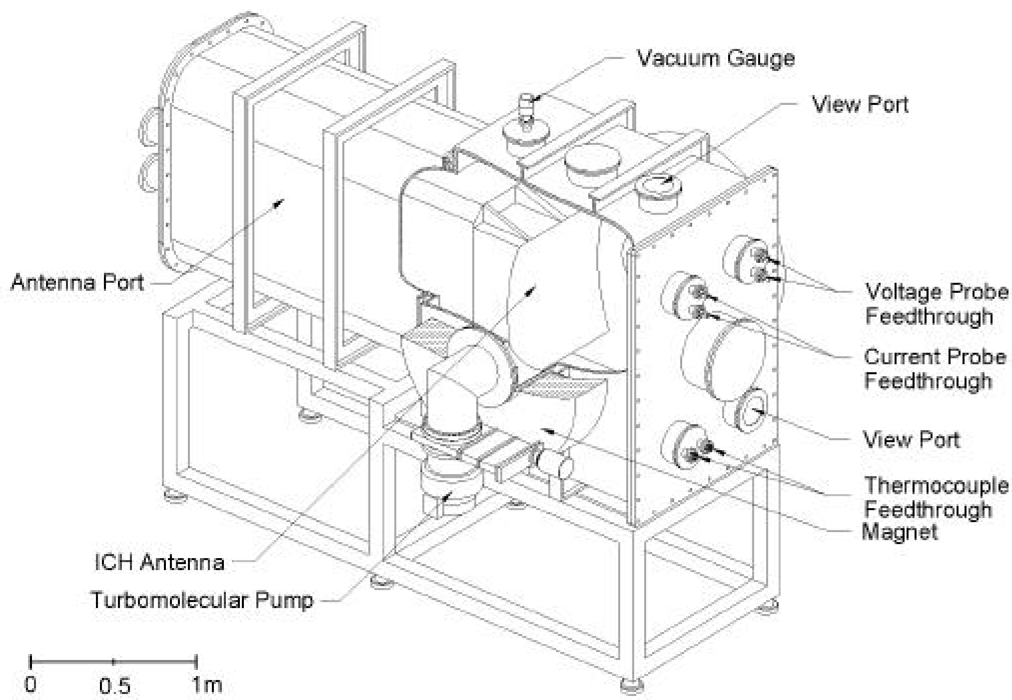

Fig. 7. RF test chamber for the ICH antenna.

참고문헌

[1] G.S. Lee et al., *Bull. Am. Phys. Soc.* **41** (1996) 1439.

[2] B. G. Hong et al., "Physics and Engineering Aspects of the ICRF Heating and Current Drive System on KSTAR", 17th IEEE/NPSS, Symposium on Fusion Engineering, October 6-9, 1997, San Diego, USA.

[3] B.G. Hong, C.K. Hwang, S.H. Jeong, J.S. Yoon, Y.D. Bae, J.G. Kwak and M.H. Ju, 'Ion Cyclotron System Design for KSTAR Tokamak', KAERI/TR-1053/98, 1998.

[4] M. Bures, J.J. Jacquinot, D.F.H. Start and M. Brambilla, *Nuclear Fusion* **30-2** (1990) 251.

[5] D.W. Swain, R.I. Pinsker, F.W. Baity, M.D. Carter, J.S. deGrassie, E.J. Doyle, G.R. Hanson, K.W. Kim, R.A. Moyer and C.C. Petty, *Nuclear Fusion* **37-2** (1997) 211.

[6] 'JET Joint Undertaking, Progress Report 1993', 1994, p.45.
[7] S. Ramo, J.R. Whinnery and T.V. Duzer, 'Fields and Wave in Communication Electronics', JohnWiley & Sons, 1994, p.250.
[8] H. Kimura, T. Fujii, Y. Ikeda, M. Saigusa, J. Sagawa, M. Seki, M. Uehara, N. Kobayashi and Y. Saito, 'Power Test of the JT-60 ICRF Launching System', JAERI-M86-113, 1986.