

Weekly Report

(Traveling Wave Antenna)

KW univ., 정은지

eunjijung1107@gmail.com, 010 8596 9368



목차

1. Design and RF test of a prototype traveling wave antenna for helicon current drive in KSTAR
2. Design of multipactor-suppressed high-power VFT for helicon current drive in KSTAR
3. Helicon wave coupling in KSTAR plasmas for off-axis current drive in high electron pressure plasmas
4. Test and operation of high-power RF system for KSTAR helicon current drive system
5. RF design of helical long-wire traveling wave antenna for helicon current drive in KSTAR

1. Design and RF test of a prototype traveling wave antenna for helicon current drive in KSTAR (2018)

연구 배경

플라즈마 중심(또는 중심 축)에서 벗어난 위치에서, 플라즈마 내부에 전류를 유도하거나 생성하는 과정
필요성: 플라즈마 주변부에서 전류를 구동하면 플라즈마의 안정성이 향상 /
플라즈마 내 전류의 공간 분포(profile)를 최적화하여 핵융합 반응을 효율적으로 유지하는 데 도움

- 'helicons' 가 다른 non-inductive current drive 기술보다 높은 off-axis current drive 효율을 보일 가능성.
- 실험적으로 증명 되지 않았으며, 안테나 디자인이 성능 실험을 위한 관건 중 하나.
- 낮은 송신 전력에서의 KSTAR의 mock-up TWA를 사용한 helicon wave 커플링 실험은 수행 성공.
- 고출력 성능[medium power (100–300 kW) RF system]을 확인하기 위해서 새 prototype TWA를 디자인.

Mock-up TWA (center freq. 500 MHz)

모형 TWA는 스테인리스 스틸로 만들어졌으며, combline 필터 설계 이론을 기반으로 하는 N형 입력 및 출력 커넥터가 있는 7개의 전류 스트랩으로 구성된다.

안테나의 급전(feeding) 구조는 L2에 의해 커패시턴스를 갖는 모노폴 안테나로 단순화될 수 있으며, 여기서 공진 주파수는 L1과 L2의 조합에 의해 결정된다.

combline 안테나의 임피던스 대역폭은 주로 L1에 의해 결정되며, L1의 최적 전기적 길이(θ)는 최대 임피던스 대역폭을 달성하기 위해 약 53° 이다.

최대 임피던스 대역폭을 얻기 위해 필요한 커패시턴스도 증가하여 전류 스트랩 끝에서 전계 강도가 증가한다.

전계 강도를 줄이기 위해 전류 스트랩 끝의 모양은 원형으로 설계되었다.

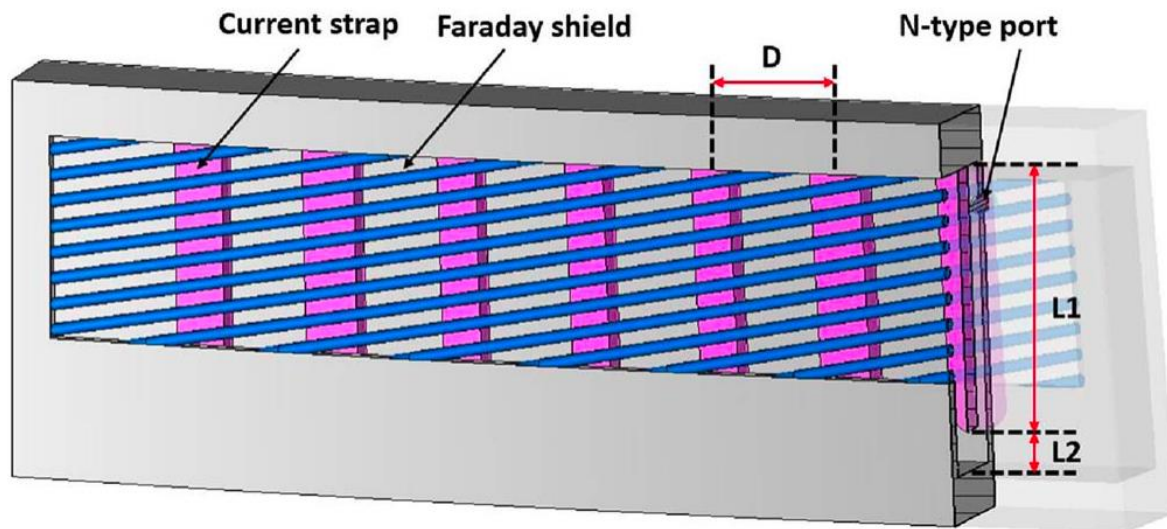


Fig. 2. 3D model of mock-up TWA.

그림 4는 산란 매개변수 $S_{11} = V_r/V_f$ 및 $S_{21} = V_t/V_f$ 를 보여준다.

여기서 V_f , V_r 및 V_t 는 각각 진공 또는 플라즈마 로딩이 있는 모형 TWA의 전방, 반사 및 전송 전압이다.

VNA를 사용하여 커플링을 측정했을 때 입력 전력과 스윕 시간은 각각 10dBm, 20ms이다.

모형 안테나의 중심 주파수는 490MHz였지만 계산된 피크 $n||$ 값은 2.8이었다. 피크 $n||$ 500MHz에서 계산된 값은 3이었으므로 실험은 500MHz에서 수행되었다.

진공 로딩의 경우 산란 매개변수는 일반적인 대역 통과 필터 특성을 나타낸다. 플라즈마 로딩의 경우 투과 계수 S_{21} 은 진공 로딩과 유사한 반사 계수 S_{11} 을 유지하면서 상당히 감소했다.

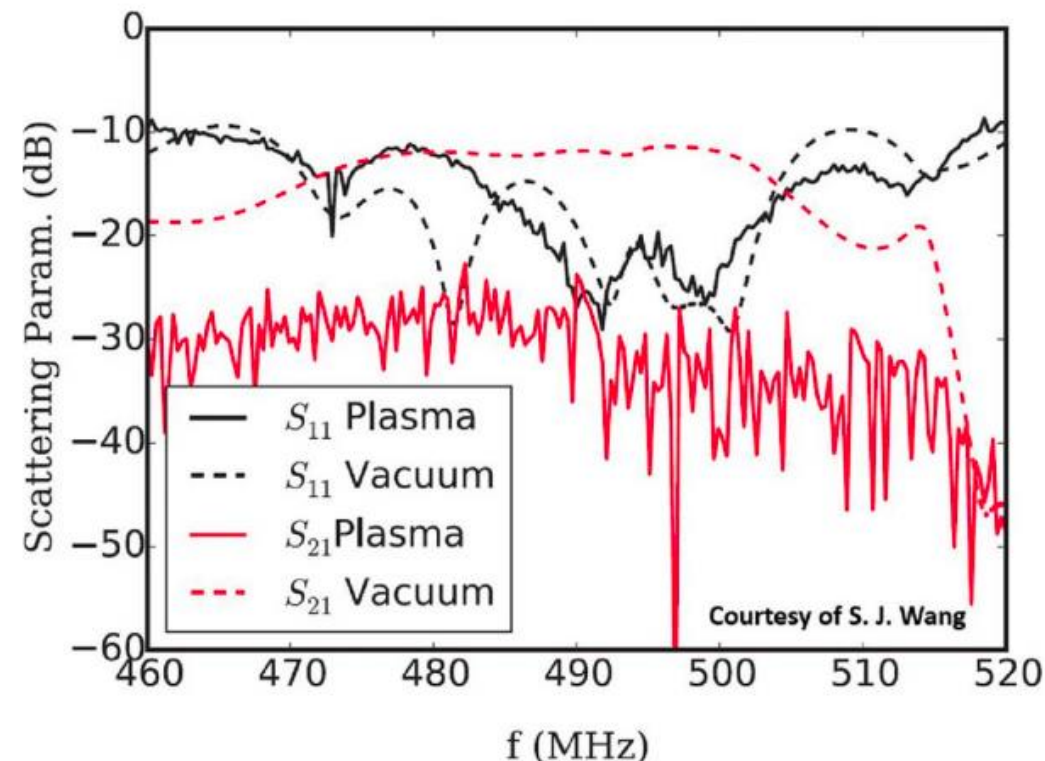


Fig. 4. Measured result of mock-up TWA, which depends on the vacuum or plasma loading.

↳ 약 -10dB 오프셋은 TWA와 RF 진공 피드스루의 N형 커넥터를 연결하는 KSTAR 진공 용기에 있는 보정되지 않은 손실 케이블로 인해 발생했다.

Prototype TWA (center freq. 500 MHz)

- P. 모형 TWA를 사용한 이전 실험 결과는 약 70~100%의 너무 높은 결합으로 작동하면 평행 굴절률 (parallel refractive index, $n_{||}$)이 왜곡된다는 것을 보여주었다.
- S. 근본적인 해결책은 스트랩의 총 수를 늘리는 동시에 단위 스트랩당 결합 에너지를 줄이는 것이다.
- P. 그러나 할당된 설치 면적 제한에 의해 전류 스트랩의 수를 충분히 늘리기 어렵다.
- S. 스트랩 간 간격을 68mm에서 50mm로 줄임으로써 같은 공간에 ^{7 -> 10} 스트랩 10개를 설치할 수 있었다.

시제품 TWA는 Ohmic 손실을 줄이기 위해 구리로 만들어졌으며 입력 및 출력 포트에 5인치 동축 공급 라인이 있는 10개의 전류 스트랩으로 구성된다.

현재 스트랩의 치수는 각각 toroidal 방향, poloidal 방향 및 radial 방향으로 28mm, 122mm 및 14mm이다.

↳ 도넛 모양의 토카막의 주위를 감싸는 방향

↳ 도넛 모양의 단면에서 플라즈마의 중심을 지나서 수직으로, 도넛의 가장자리에서 가장자리로
의 방향

↳ 도넛 모양의 플라즈마 토로이드의 중심에서부터 플라즈마의 경계까지 또는 그 반대 방향으로 향하는 방향

- 전류 스트랩의 치수:
toroidal 방향, poloidal 방향 및 radial 방향으로 각각 28mm, 122mm 및 14mm
- 전류 스트랩의 전기적 길이 (~72°)는 프로토타입의 중심 주파수를 500MHz로 조정하기 위해 약간 감소.
- 전류 스트랩 사이의 간격: 500MHz에서 $n_{||} = 3$ 을 고려하여 50mm로 조정.
- 느린 파동 여기를 피하기 위해 자기장 정렬 패러데이 실드를 채택했고 경사 각도는 새로운 기준 플라즈마 평형 매개변수에 대해 8°로 약간 감소.

더욱 높은 전력을 전달하기 위해 N형 급전선이 재설계.

패러데이 실드 구조는 스트랩 사이에 지지 구조[10mm 두께의 알루미늄 세라믹($\epsilon_r = 9.5$, $\tan\delta < 5 \times 10^{-4}$)]를 추가하여 더욱 견고하게 지지하도록 설계됨.

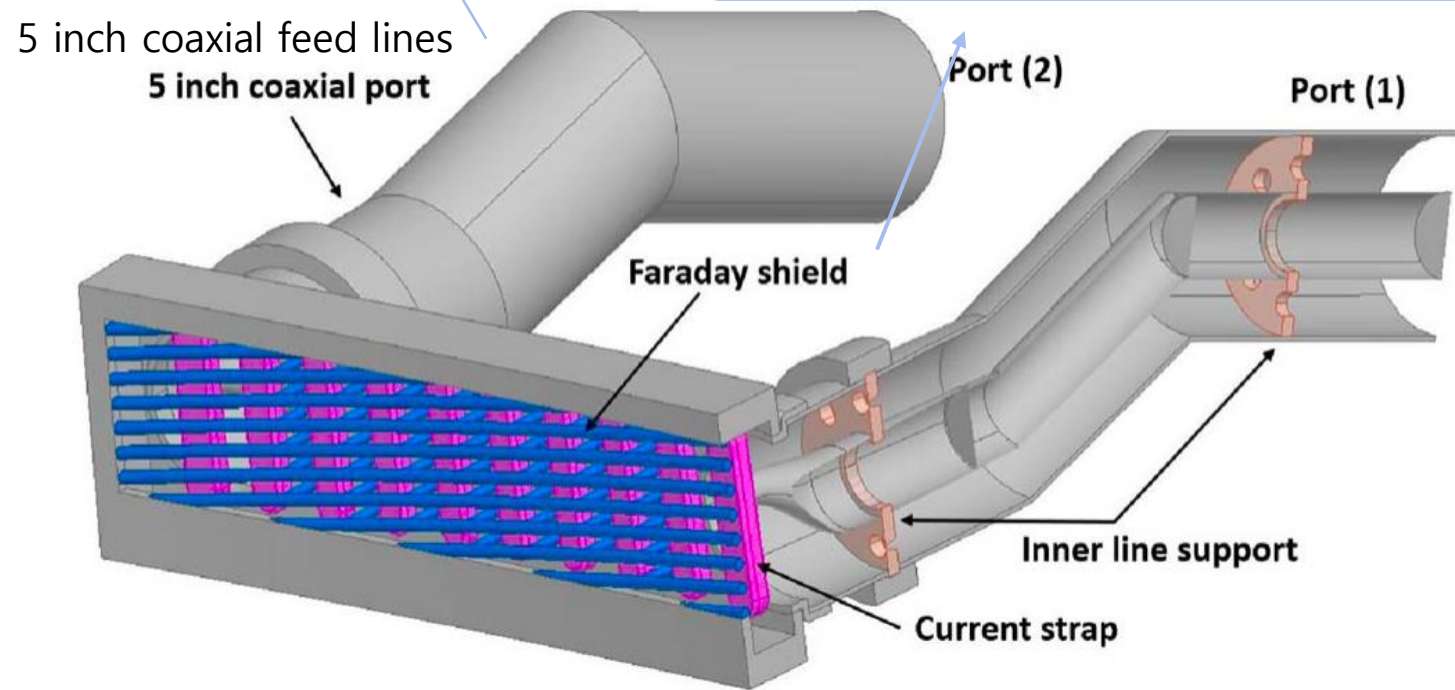


Fig. 5. 3D model of prototype TWA.

Simulated results of prototype TWA with vacuum loading

그림 7은 진공 로딩 케이스를 사용한 프로토타입 TWA의 산란 매개변수 시뮬레이션 결과를 보여주며, 전형적인 대역 통과 필터 특성을 보여준다.

프로토타입 TWA의 임피던스 대역폭은 약 30MHz($S_{11} < -20\text{dB}$)로, 전류 스트랩의 전기적 길이가 감소하여 모형 TWA에 비해 증가했다.

통과 대역에서 S_{21} 은 거의 0dB였습니다. 시뮬레이션에서 Ohmic 손실은 무시했다.

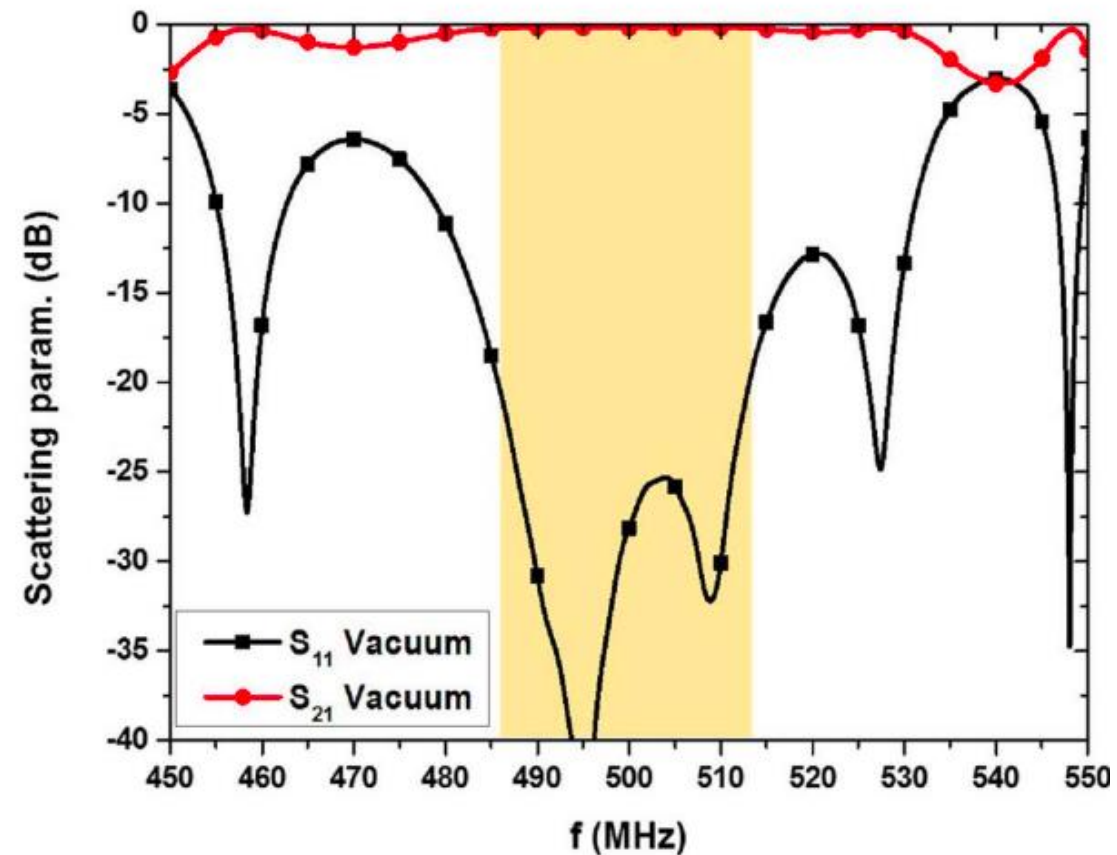


Fig. 7. Simulated scattering parameters of prototype TWA.

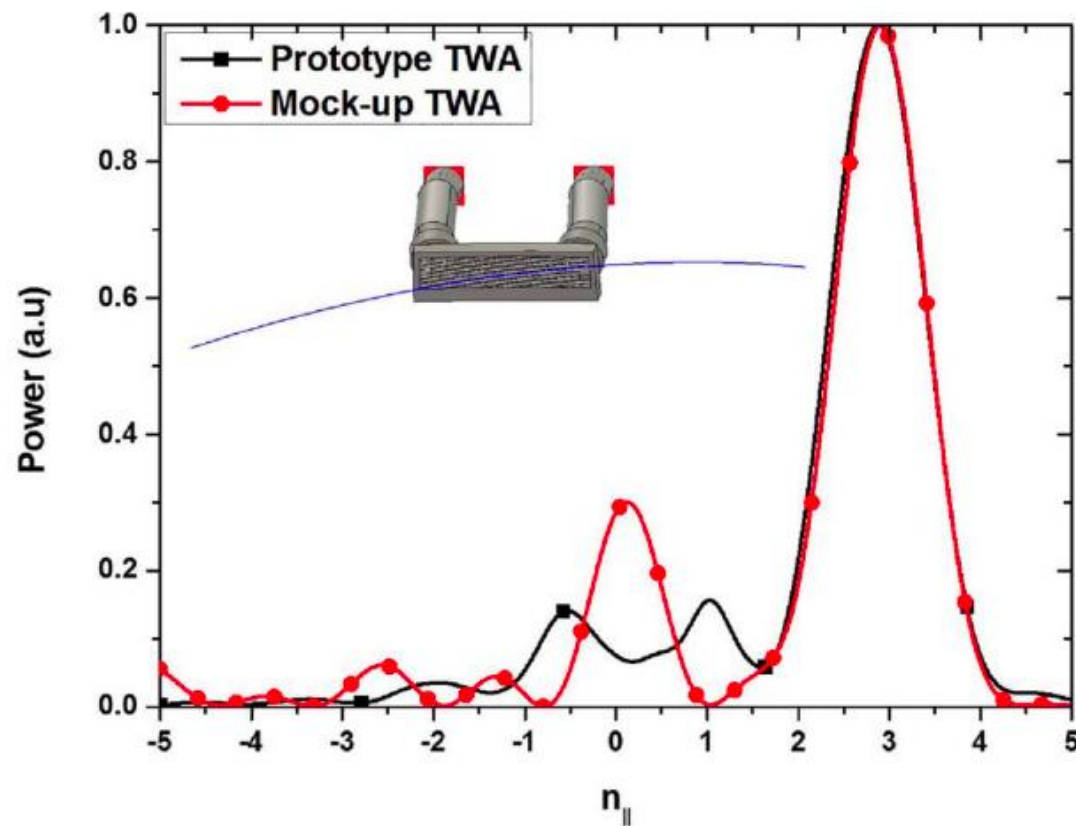


Fig. 8. Calculated power spectrums of the mock-up and prototype TWAs at 500 MHz.

그림 8은 모형 및 모형 TWA의 계산된 전력 스펙트럼을 보여준다. 피크 n_{\parallel} 프로토타입 TWA의 값은 3이며, 이는 모형 TWA와 같고, 프로토타입 TWA의 전력 스펙트럼은 현재 스트랩의 수가 더 많기 때문에 모형 TWA보다 약간 좁다.

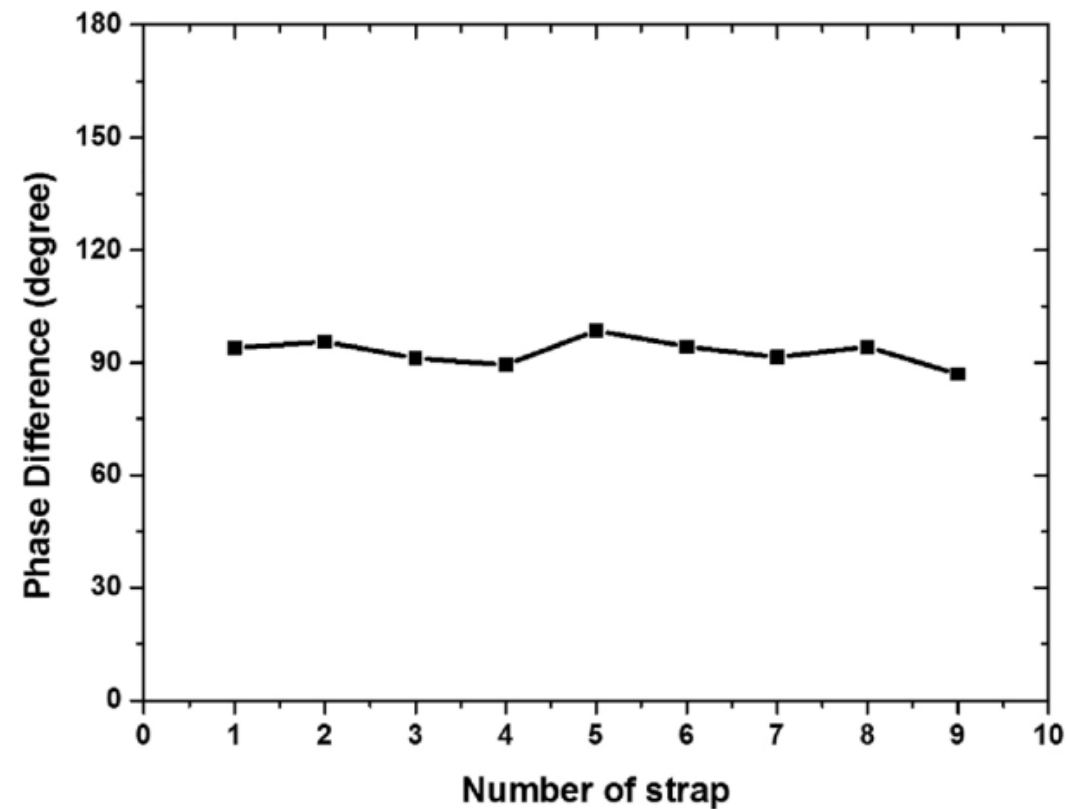


Fig. 9. Phase difference between the neighboring straps at 500 MHz.

c 는 빛의 속도, k_{\parallel} 는 토로이드 파수, $\Delta\phi$ 및 d 는 각각 이웃 전류 스트랩 간의 위상차와 간격이다.

$d = 50\text{mm}$, $\Delta\phi = 90^\circ$, $f = 500\text{MHz}$ 일 때 $n_{\parallel} = 3$ 으로 계산된 피크 스펙트럼과 잘 일치했다.

Simulated results of prototype TWA with simplified plasma loading

플라즈마 부하 조건에서 안테나의 성능을 추정하기 위해 플라즈마 모방 재료인 해수를 사용하여 시뮬.

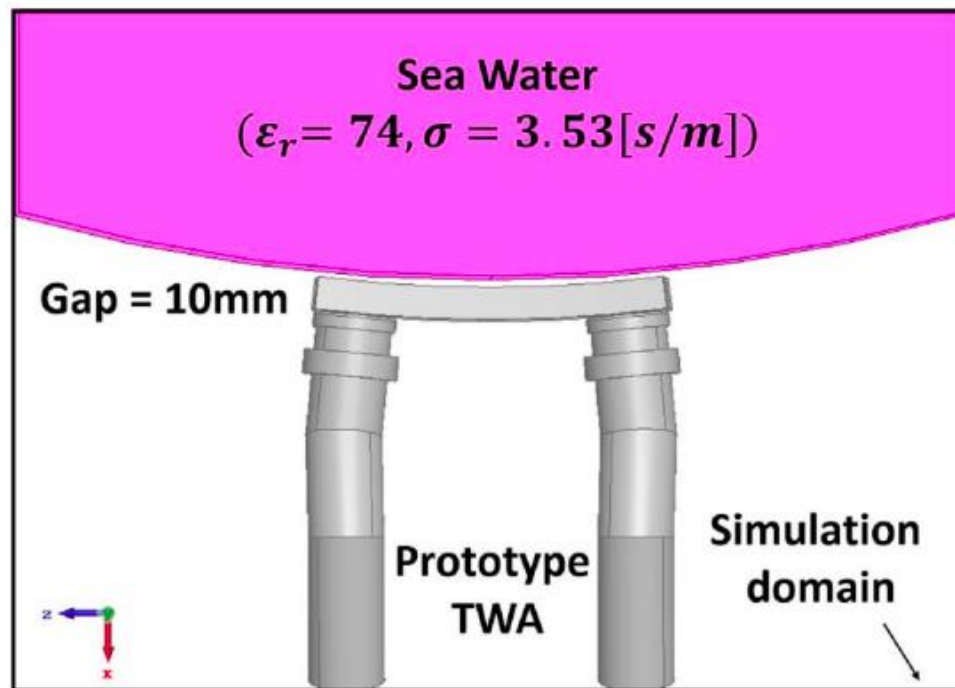


Fig. 10. 3D model of prototype TWA with sea water.

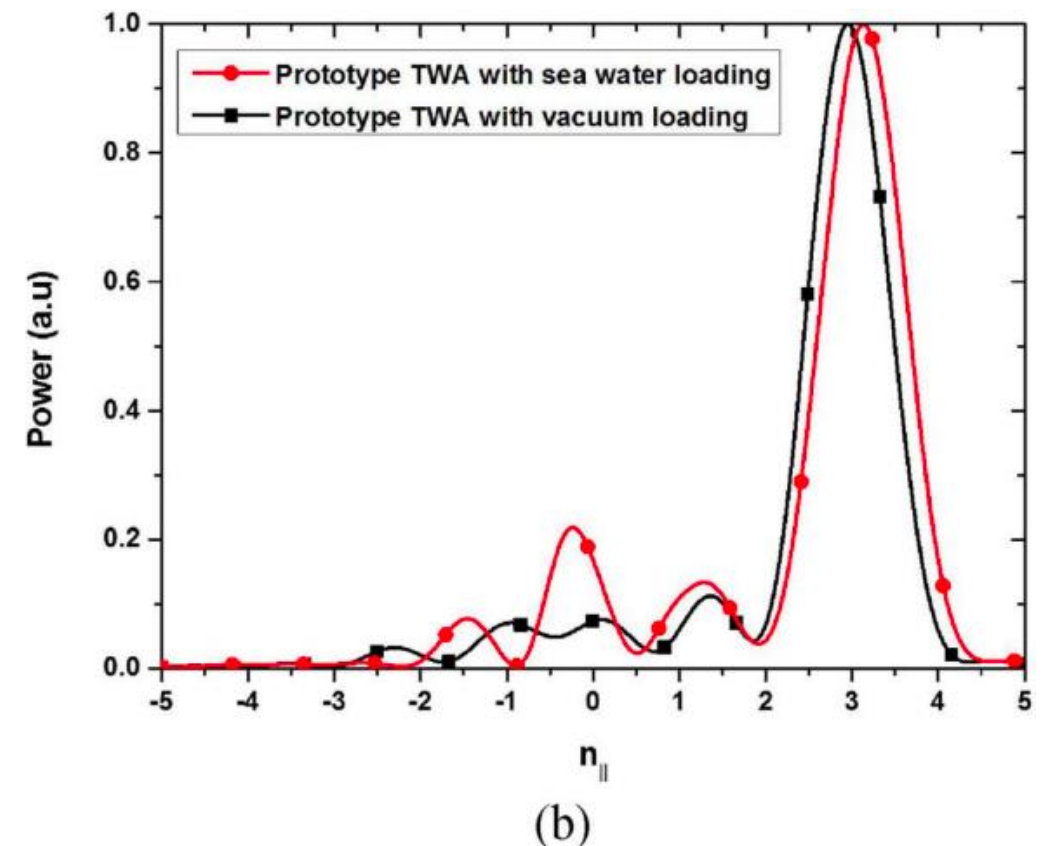
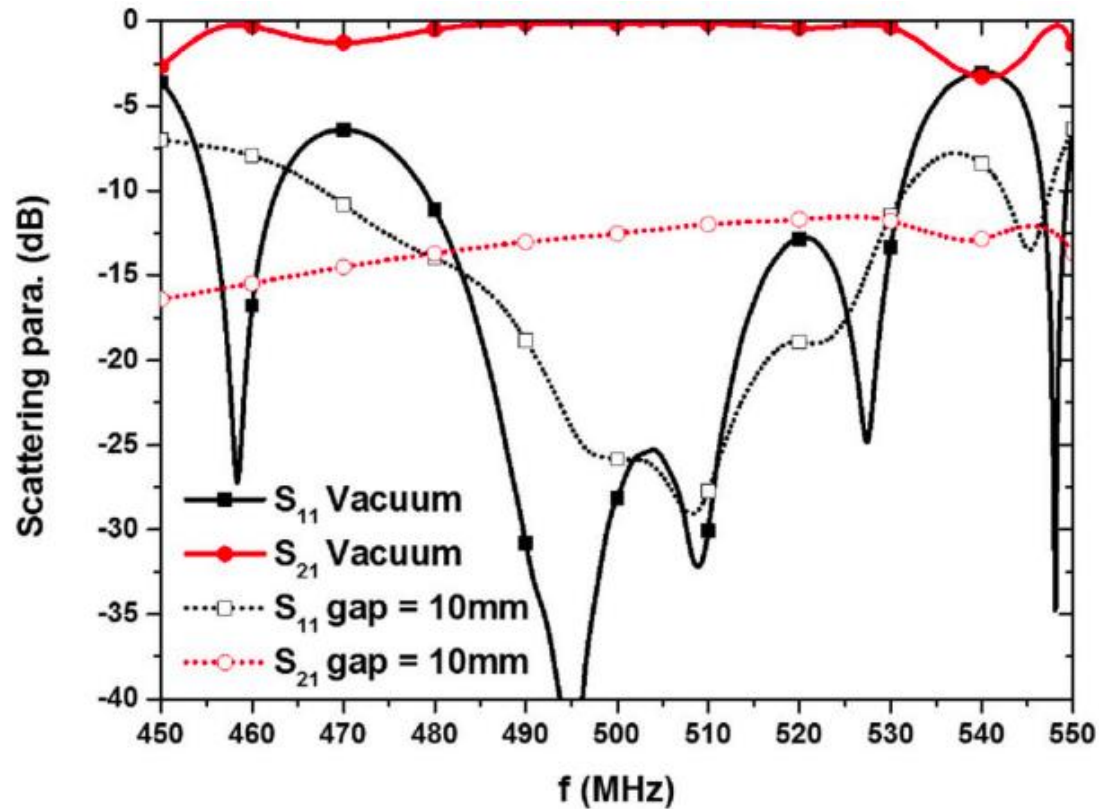


Fig. 11. Simulated results of prototype TWA with vacuum load and sea water loading; (a) scattering parameters, and (b) power spectrum.



(a)

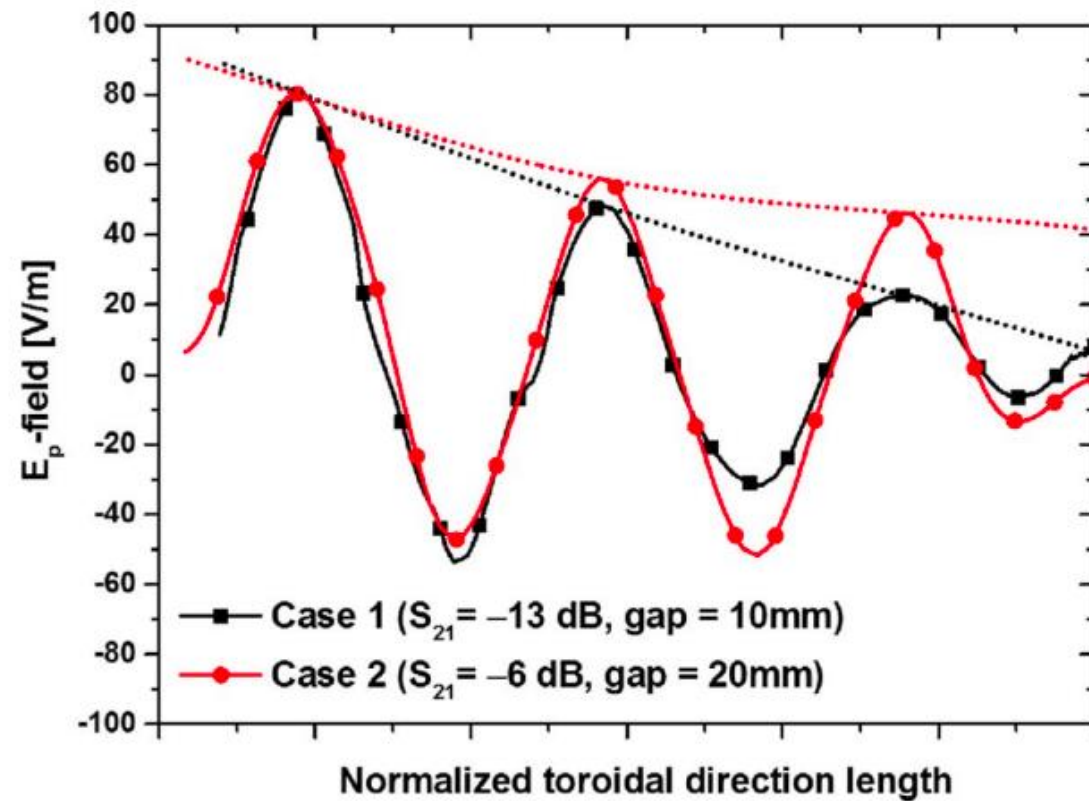
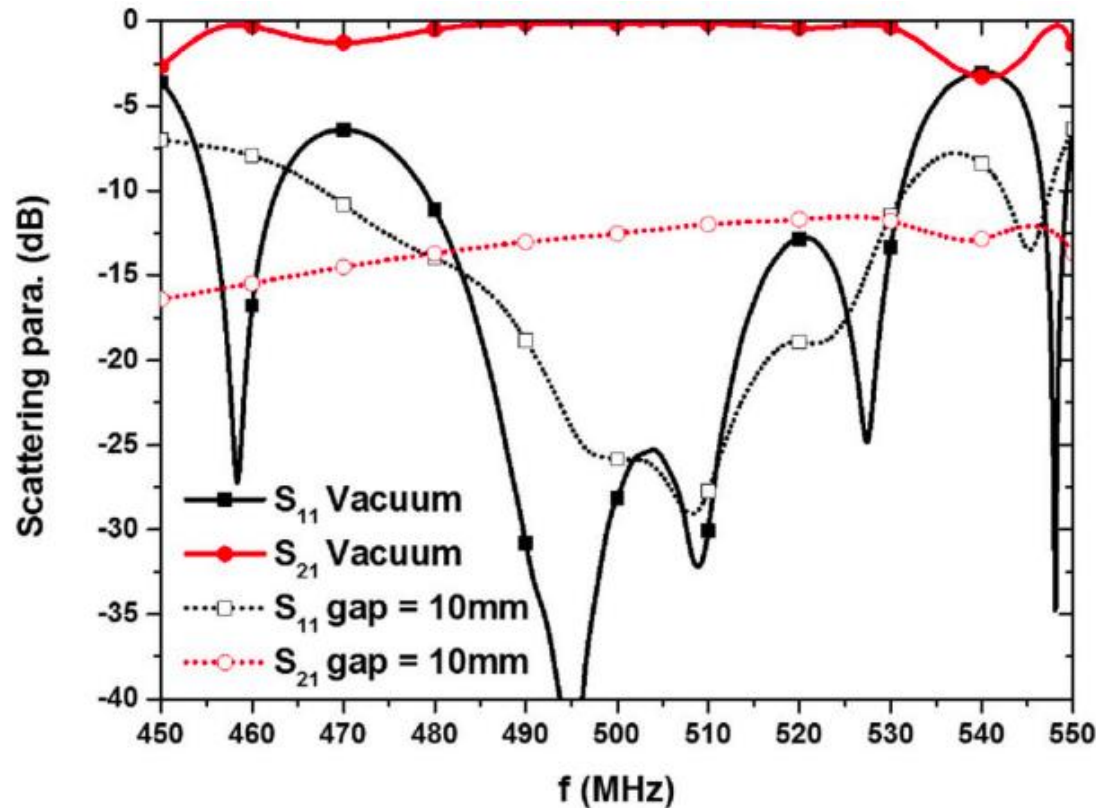


Fig. 12. The simulated electric field in front of the antenna for different coupling.

해수의 치수($\epsilon_r=74$, $\sigma=3.53$ [s/m])는 각각 토로이드, 폴로이달 및 반경 방향으로 1600mm, 1000mm 및 500mm였다. 안테나와 해수 사이의 반경 간격은 10mm였다. 피크 $n||$ 그리고 공진 주파수는 진공 로딩 케이스와 비교하여 약간 상향 이동되었고, S_{21} 은 그림 11에 표시된 것처럼 진공 로딩과 유사한 S_{11} 을 유지하면서 상당히 감소했다(~ 13 dB).

Fig. 11. Simulated results of prototype TWA with vacuum load and sea water loading; (a) scattering parameters, and (b) power spectrum.



(a)

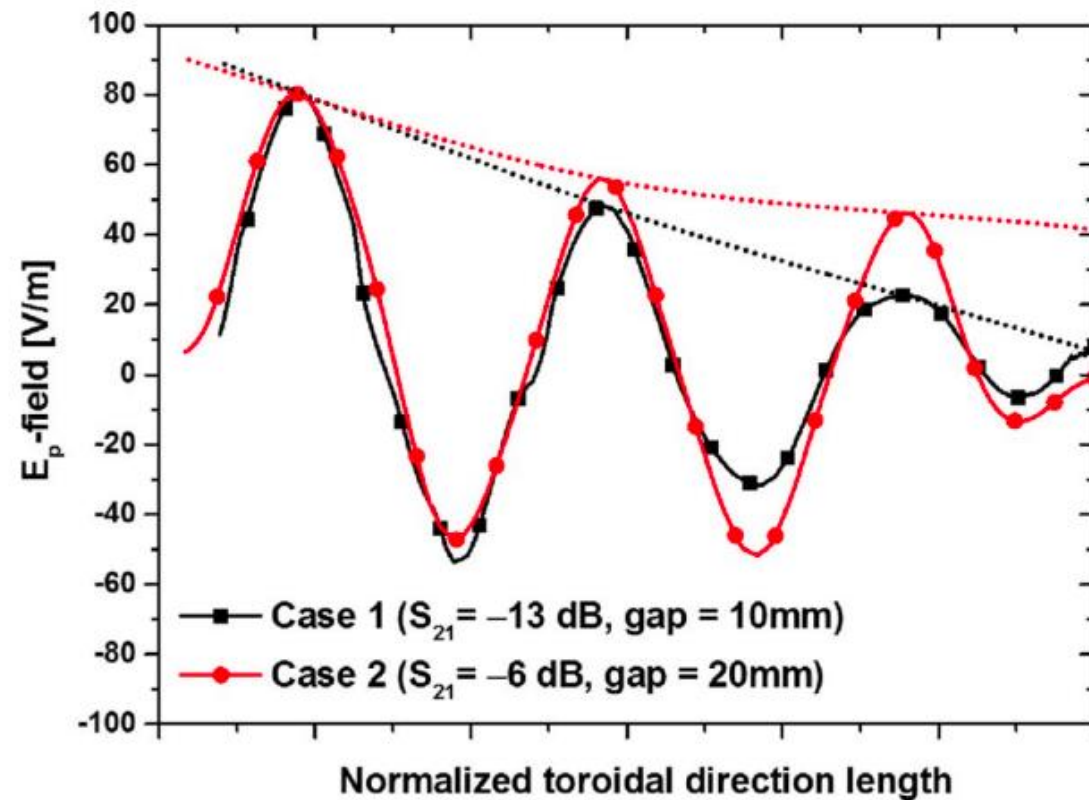


Fig. 12. The simulated electric field in front of the antenna for different coupling.

그림 12는 두 가지 다른 결합 케이스에 대한 안테나 앞의 전기장의 계산된 폴로이달 성분을 보여준다. 두 개의 점선은 다른 결합 조건의 전기장의 포락선이다. 전기장의 감쇠 곡선과 함께 토로이드 방향이 결합에 따라 변하는 것을 볼 수 있다. 감쇠 전기장 곡선을 시뮬레이션할 때 포트(1)는 1W 입력 전력으로 여기되었고 포트(2)는 50Ω의 부하로 종단되었다.



Fig. 13. Photograph of fabricated prototype TWA; front face(up), and rear face (down) with back-plate removed.

프로토타입 TWA의 표면을 플라즈마 열/입자 부하로부터 보호하고 플라즈마로의 구리 증발을 줄이기 위해 프로토타입 TWA의 전면은 두께 50 μ m의 텅스텐으로 코팅되었다.
프로토타입 TWA의 시뮬레이션 및 측정 결과는 잘 일치하는 것으로 나타났으며, 500MHz에서 $S_{21} = -0.55$ dB가 측정되었다. 이는 진공 전송선에서의 오믹 손실과 RF 진공 챔에서의 유전 손실로 인해 발생했다.

4. Test and operation of high-power RF system for KSTAR helicon current drive system (2021)

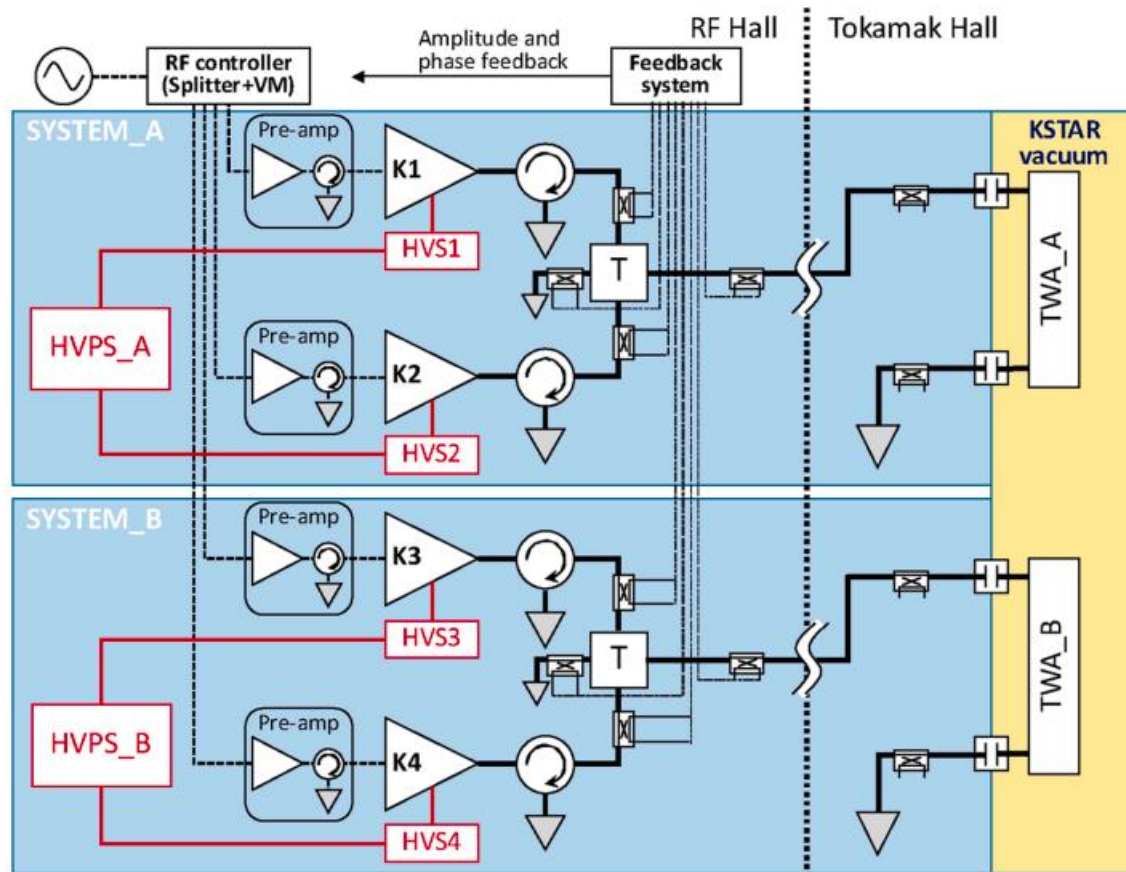


Fig. 1. RF schematic drawing of 4-MW HWCD system with four klystrons, two antennas, and two HVPSs.

선제 테스트 결과

4개의 Klystron 중,
2개는 초점 필드가 조정된 후 진공에서 고전력 RF
생성까지 완전히 테스트 되었고,
2개는 진공 상태에서만 테스트 되었다.

완전히 테스트된 2개의 Klystron은 KSTAR 가열
장치실의 상부 데크에 설치되었고, 이 중 하나가
본 연구에서 정격 RF 전력보다 낮은 전력에서 새로
운 **고전압 전원 공급 장치(HVPS)**로 시운전되었다.

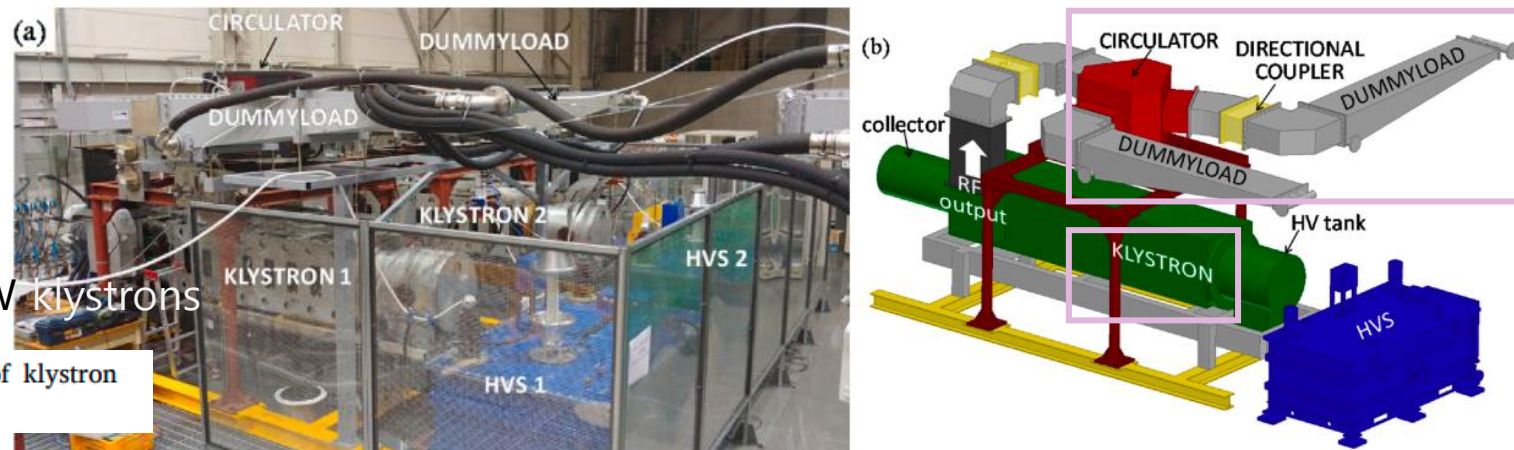
본 연구의 Klystron 시스템은 정격 전력보다 낮은 전력
수준에서 시운전되었지만, 헬리콘 시스템 작동을 연기할
수 있는 손상이나 예상치 못한 문제를 피하기 위한 프로
토타입 TWA의 전체 성능 테스트를 하기에는 충분했다.

2. HWCD system

Test Setup

for the commissioning of high-power CW klystrons

Fig. 2. (a) Photograph of two klystrons; (b) 3D CAD drawing of klystron test setup.



RF 시스템 전력 클라이스트론 증폭기, 고전력 전송선 구성 요소, 저전력 RF 드라이브 및 RF 감지 시스템

↳ E/H-bends, 유연한 도파관(waveguides), 방향성 커플러

**HVPS
시스템**

HV 보호 스위치와 제어 시스템이 있는 고전압 DC 전원 공급 장치

**보조
시스템**

보조 전원 공급 장치, 수냉 시스템 및 데이터 수집 및 인터록이 있는 제어 시스템

Klystron은 $2\text{MW}(83.5\text{kV} \times 24.1\text{A})$ 전자 빔에서 476MHz CW로 최대 1.2MW RF 전력을 생성한다.

2.1. High-power RF system with klystron

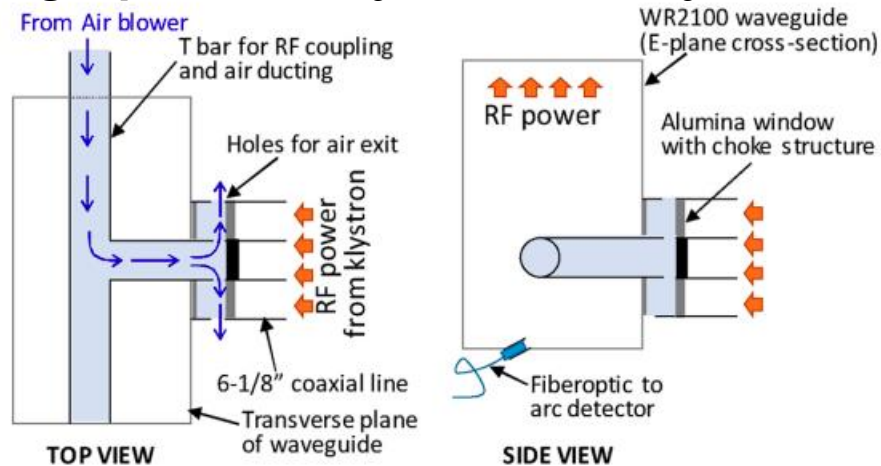


Fig. 3. T-bar coaxial to rectangular waveguide transition.

2.4. Auxiliary power supply systems (보조)

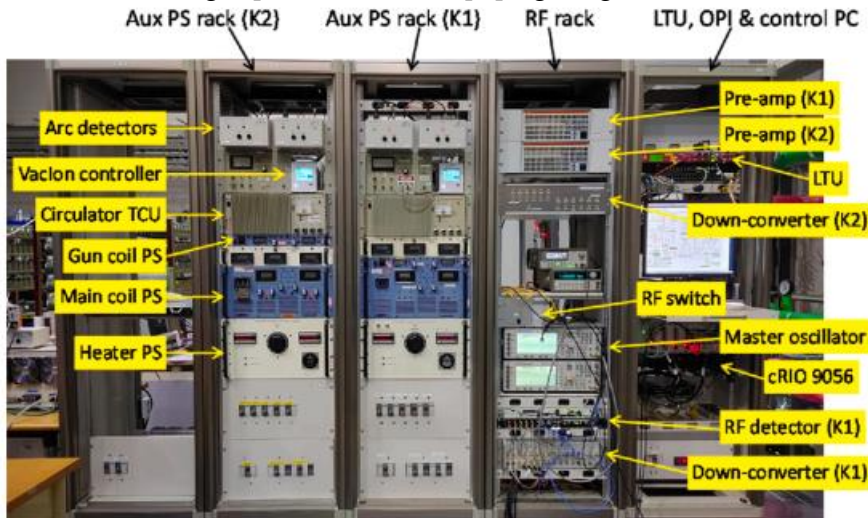


Fig. 4. Auxiliary power supplies mounted in 19" racks.

2.2. Low-level RF drive and RF detector

저레벨 RF(to Klystron 증폭기) 구동 구성: 발진기, PIN 다이오드 RF 스위치, 솔리드 스테이트 증폭기(SSA)

- 발진기는 신호 발생기(E4438C, Agilent)이다.
- 빠른 PIN 다이오드 RF 스위칭은 $3\mu\text{s}$ 이내에 Klystron 출력에서 과도한 VSWR 조건이 발생할 경우 Klystron으로의 RF 구동을 억제한다.
- SSA는 125W(AR MODULAR RF, 모델 KAW2051M12)보다 높은 정격 출력 전력으로 55dB의 고정 이득을 갖는다.

이중 방향성 도파관 커플러는 60dB의 전방 및 반사 전력을 결합하는 데 사용된다. 결합된 476MHz RF 신호는 461MHz의 LO 신호와 혼합되어 다운 컨버팅 믹서 회로에서 15MHz의 IF 신호를 생성한다. IF 신호는 RF 검출기에 입력되며 RF 검출기는 FPGA와 고속 ADC를 사용하여 300초 동안 good time resolution (20MS/s)으로 IF 신호의 진폭과 위상을 모니터링하고 수집합니다.

2.3. HVPS system

: 다중 권선 절연 변압기, PSM(펄스 스텝 변조 기술) 모듈 및 제어 시스템

↳ 각 PSM 모듈의 전압은 0.6kV로 조절 -> 180개의 PSM 모듈이 직렬로 연결되어 92kV를 생성

P. HVPS의 PSM은 광 케이블을 통한 고장 신호에 의해 즉각적으로 꺼지지만, 큰 커패시턴스를 가진 긴 HV 케이블에 저장된 에너지가 통과하면 Klystron이 손상된다.

S. 92kV × 32A 정격의 **고전압 스위치(HVS)**를 Klystron 근처에 설치하여 HV 케이블에서 클라이스트론으로 축적될 수 있는 저장된 에너지를 최소화한다.

+ HVS의 다른 용도는 하나의 HVPS로 구동되는 두 개의 Klystron을 독립적으로 작동하는 것이다. 두 개의 Klystrons가 KSTAR의 안테나와 테스트 베드에 연결된 경우 HVS는 다른 Klystron의 작동을 방해하지 않고 두 Klystron에 대한 HVPS 연결을 열고 닫을 수 있어야 한다.

남은 연구 과제:

안테나, 진공 피드스루, 컴팩트한 물 부하와 같은 여러 유형의 고전력 RF 구성 요소는 아직 테스트 베드에서 개발 및 조사되어야 한다.

2.5. Cooling system (보조 시스템)

Fig. 5. Schematic diagram of high-power RF system for klystron test with temporary water cooling system including closed-loop cooling system for HCW.

RF 손실 냉각수

고도 전도도 물(HCW):

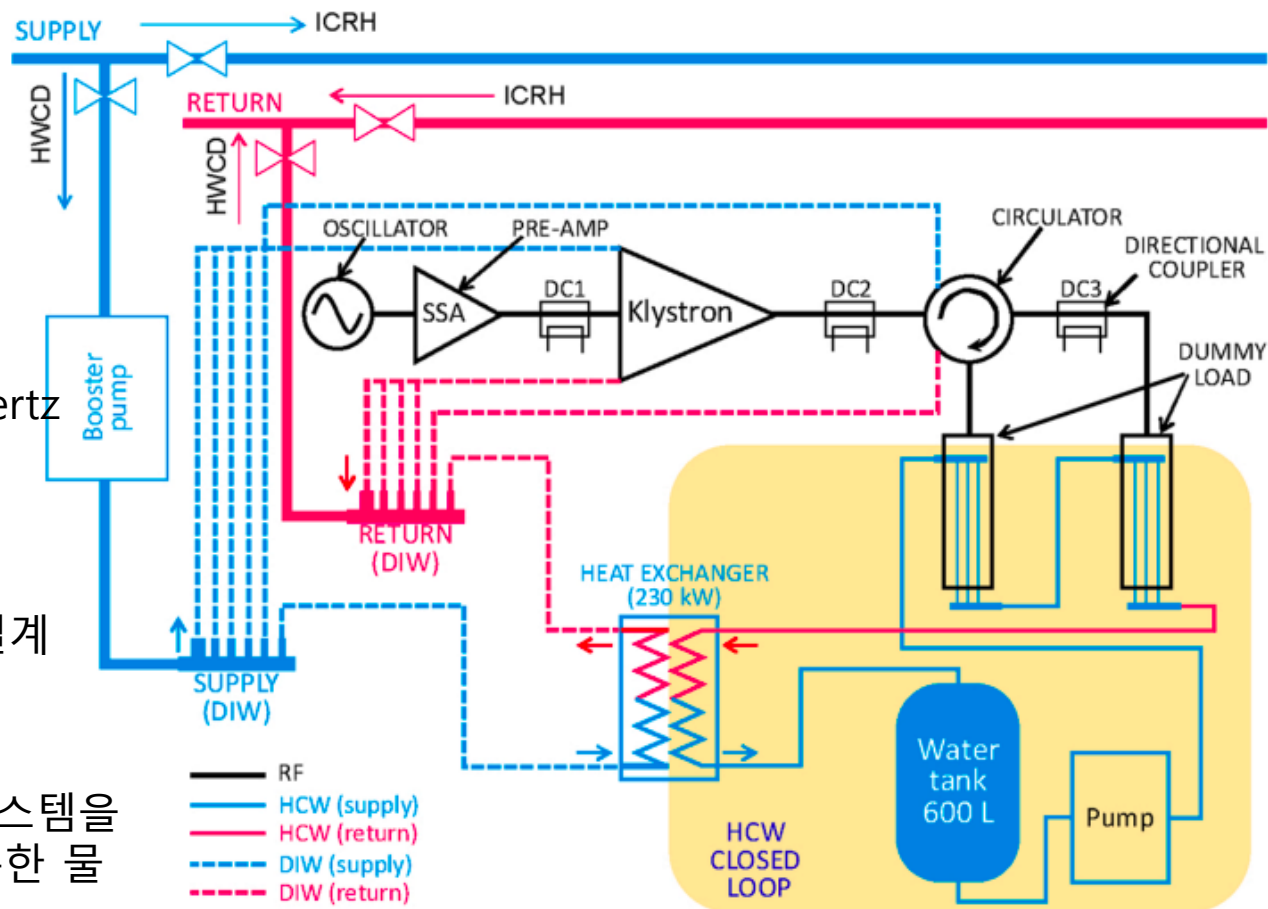
DI 수의 감쇠 상수가 1GHz 미만의 주파수 범위에서 매우 낮기 때문에 RF 손실 냉각수로 사용됨.

A glycol-water or soda-water mixture:

+ 많은 부하에서 냉각제로 사용되어 서브 subgigahertz 범위에서 RF 감쇠를 개선.

- 환경 문제로 인해 폐기하기 어려움. (HCW가 나옴)
- 열 전달 특성이 좋지 않아 순환 펌프와 열교환기 설계에 영향을 줌.

모든 채널의 냉각수의 온도 증가와 유량은 인터록 시스템을 통해 모니터링되어 Klystron 및 도파관 부하를 불충분한 물 흐름과 고온의 복귀수로부터 보호한다.



2.6. Interlock and control system (보조 시스템)

FPGA 기반 cRIO 컨트롤러(NI cRIO 9056):

데이터 수집 및 다양한 인터페이스 보조 시스템과의 실시간 데이터 통신을 위해 채택

NI 9205: 히터 전원 및 코일 전원 공급 장치의 전압 및 전류, 이온 펌프 전류, 유량 및 냉각수의 반환 온도와 같은 느린 응답 신호를 수집하는 데 사용

NI 9223: 클라이스트론 음극 전압 및 전류에서 빠른 아날로그 입력을 수집

NI 9401: 아크 또는 KSTAR 비상 사태(lp 오류)와 같은 중요한 이벤트에 대한 빠른 응답을 제공하는 디지털 IO 인터페이스

Ex) RF 스위치와 HV 컨트롤러에 인터록 신호를 보내 클라이스트론에서 RF 드라이브와 HV 전원을 즉시 제거하고 보호

Result

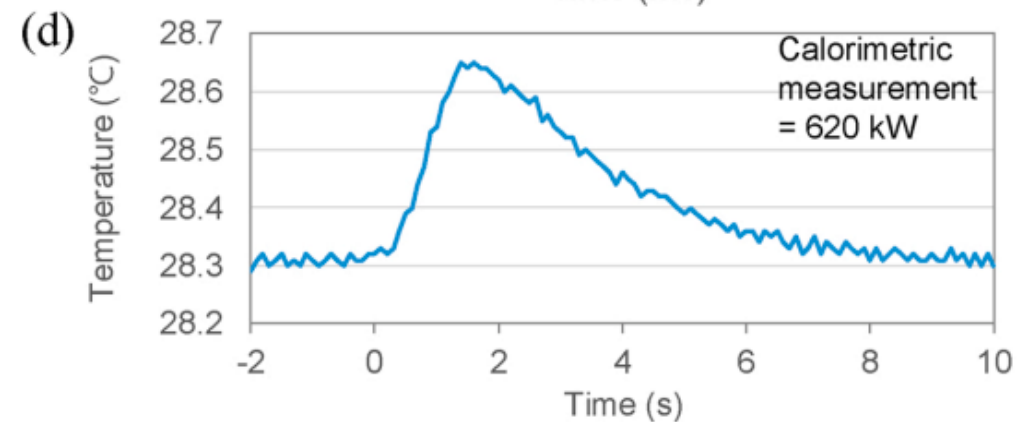
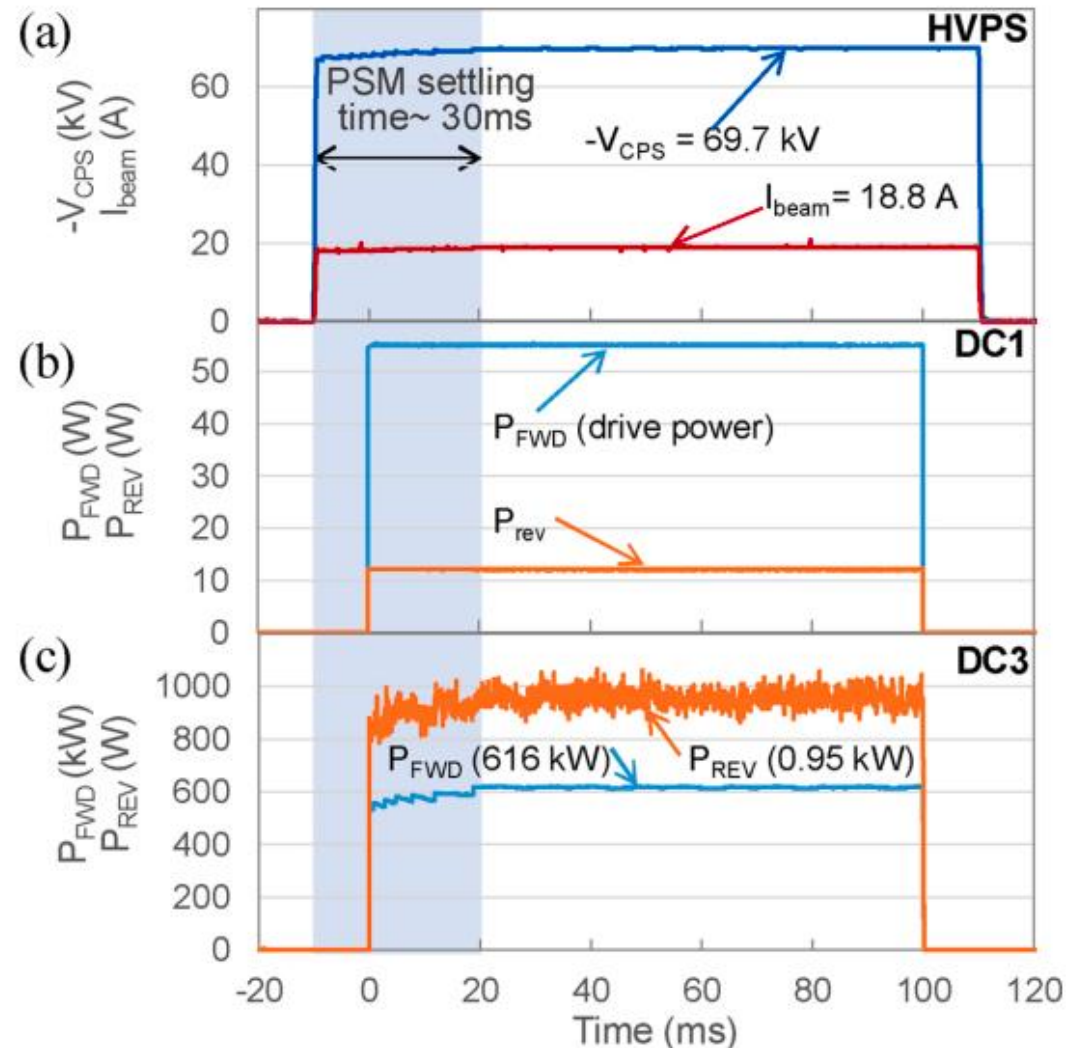
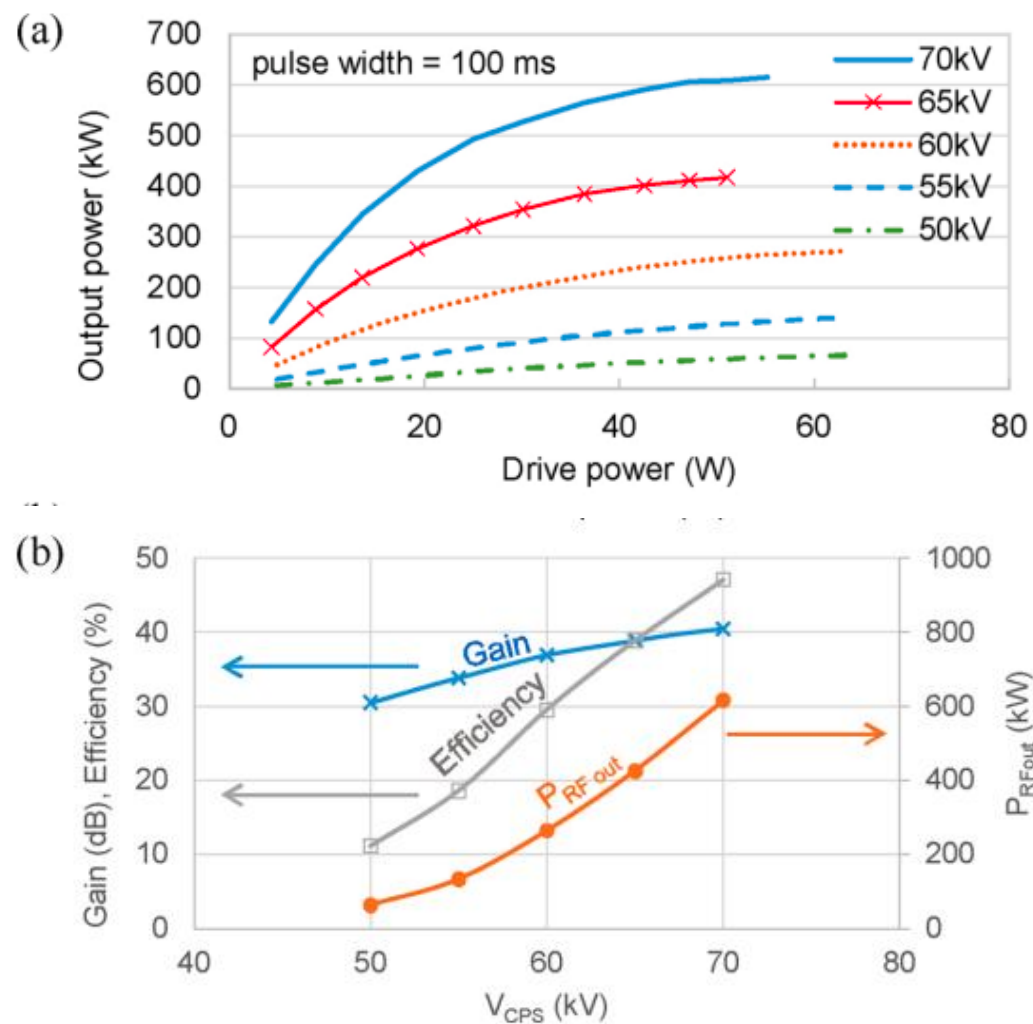


Fig. 7. Klystron test result. (a) Klystron CPS voltage and current. Forward and reflected RF powers measured at (b) klystron input (RF drive) and (c) circulator output. (d) Calorimetric measurement at water load. Calorimetry is for reference only because its time resolution is coarse compared with the pulse length.

- RF 출력 전력은 620kW이고 빔 전력은 $69.7\text{kV} \times 18.8\text{A}$ 로 그림 7에 나와 있다. 그림 7(c)의 RF 검출기에서 측정된 출력 RF 전력은 그림 7(d)에 나와 있는 열량 측정과 잘 일치한다.

Result

Fig. 8. (a) Klystron output vs. drive power at various CPS voltages. (b) Klystron output power, gain, and efficiency vs. CPS voltage with fixed drive power = 55 W and pulse width = 100 ms.



- 다양한 음극 전원 공급(CPS) 전압에서 클라이스트론 출력 전력 대 구동 전력은 그림 8(a)에 그래프로 표시되어 있다.
- CPS 전압에 따른 이득, 효율 및 출력 전력은 포화된 출력에서 그래프로 표시되었으며, 이는 그림 8(b)와 같다.

5. RF design of helical long-wire traveling wave antenna for helicon current drive in KSTAR (2023)

? HCD 개발, DEMO

연구 배경

→ DEMO 관련 토카막 플라즈마의 중간 반경 영역에서 예상되는 높은 전류 구동 효율로 인해 유망한 축외 전류 구동 액추에이터로 제안됨.

- 헬리콘 전류 구동에 사용된 이전 안테나는 중간 전력(100kW ~ 300kW) 수준에서 설계, 제작 및 작동.
- 전자 온도 증가의 실험적 확인 및 hard X선은 축외 전류 구동 효율을 검증하기 위해 필요.
- 따라서 MW급 RF 전력을 처리할 수 있는 안테나를 개발하는 것이 필수적.
- 이 논문에서는 MW 수준의 RF 전력을 처리할 수 있는 나선형 장선 이동파 안테나(LW-TWA)를 소개.

- TWA
- 장점: 부하 조건 변화에 대한 낮은 민감도, 낮은 전기장 특성, 넓은 임피던스 대역폭, 높은 지향성
- 관심 분야: 핵융합 플라즈마에서 가열 및 전류 구동을 위한 효과적인 장치

이온 사이클로트론 공명 가열(ICRH), 낮은 하이브리드 전류 구동(LHCD) 및 헬리콘 전류 구동 시스템 ←

- 이 논문의 모든 전자기 시뮬레이션은 상용 소프트웨어 패키지인 CST Microwave Studio로 수행되었다.
- 이 설계는 평행 굴절률($n_{||}$) 측면에서 안테나의 성능을 검증하는 것을 목표로 한다. (다른 특성은 후속 연구)

[RF design of helical long-wire traveling wave antenna for helicon current drive in KSTAR.pdf](#)

Helical LW-TWA의 schematic conceptual 설계

1. 긴 와이어 안테나(LW-TWA)는 전주파에서 작동하는 통신 시스템에서 수신 안테나로 사용된다.
2. L_1 의 길이를 $5/4$ 파장으로 설계하면 이웃 전류원 간의 위상차가 90° 가 될 것으로 예상할 수 있다.
3. c 는 광속이고, $k_{||}$ 는 토로이드 파수이고, $\Delta\phi$ 와 D 는 각각 이웃 전류원 간의 위상차와 간격이다.
4. 기계적 안정성 향상을 위해 구조가 개선되었으며, helical 선을 지지하는 **중간 지지대(길이(H_1): 전기적으로 $1/4$ 파장)**를 추가해 기계적으로 연결하지만 전기적으로는 열린 구조를 유지한다.
5. 패러데이 쉴드가 평행 전계를 완화하기 위해 포함되며, 급전 및 종단 저항 구조도 직렬에서 병렬로 변경되어 종단 저항(R_L) 값을 감소시켰다.

➤ $n_{||} = 30$ 이고 $D = 52\text{mm}$, $\Delta\phi = 90^\circ$, $f = 476\text{MHz}$ 인 경우.

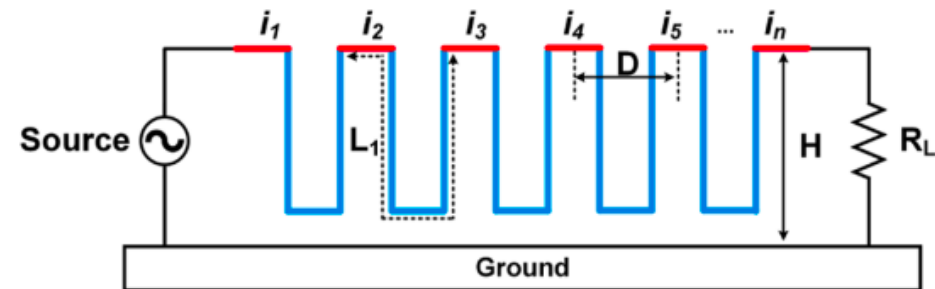


Fig. 2. Basic structure of helical LW-TWA (step 2).

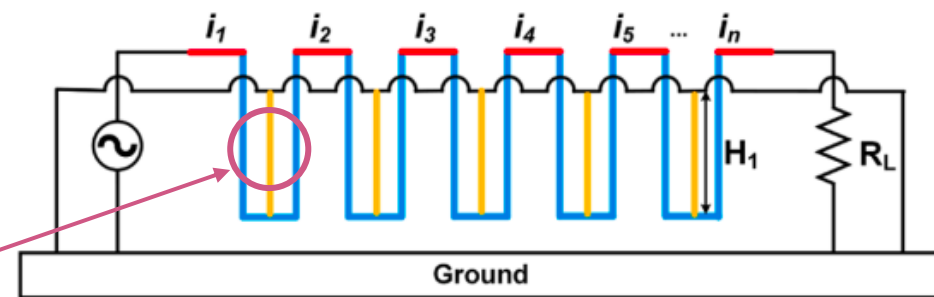


Fig. 3. Basic structure of LW-TWA (step 3).

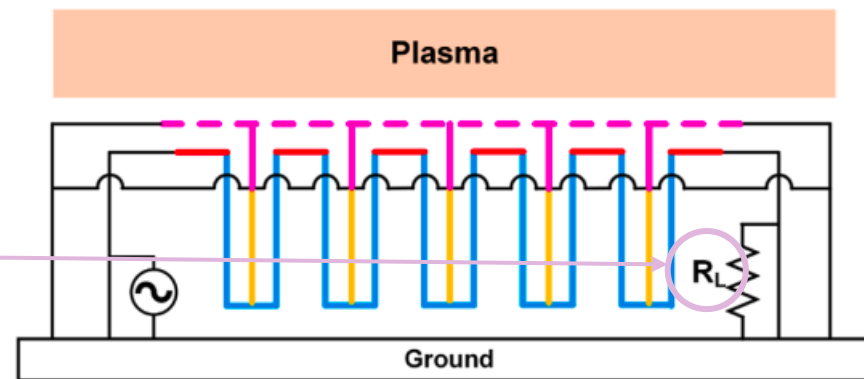
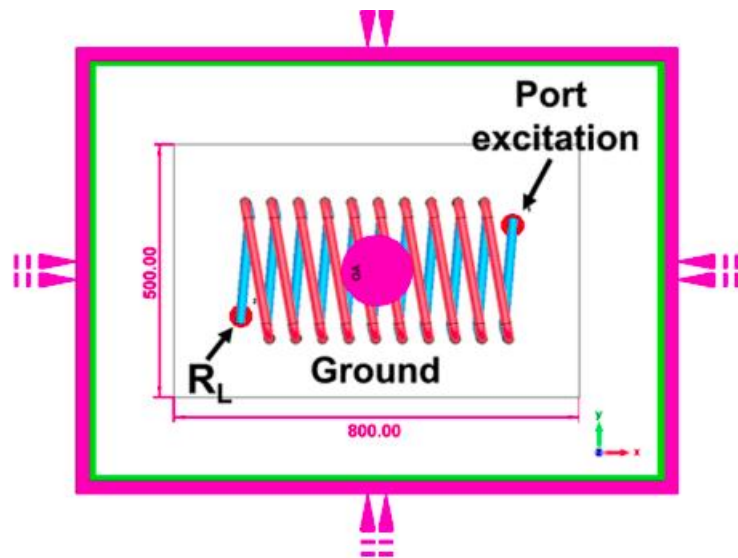


Fig. 4. Basic structure of helical LW-TWA (step 4).

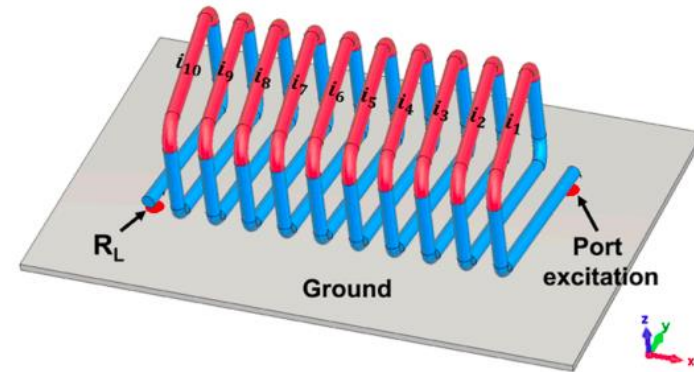
Helical LW-TWA의 개념적 RF 설계

1. 나선형 선의 단일 회전 길이는 790mm이며, 이는 476MHz에서 5/4 파장에 해당한다.
2. 나선형 라인의 총 길이는 14파장의 길이이며, 이는 전기적으로 LW-TWA 특성을 나타낼 만큼 충분히 광범위하다.

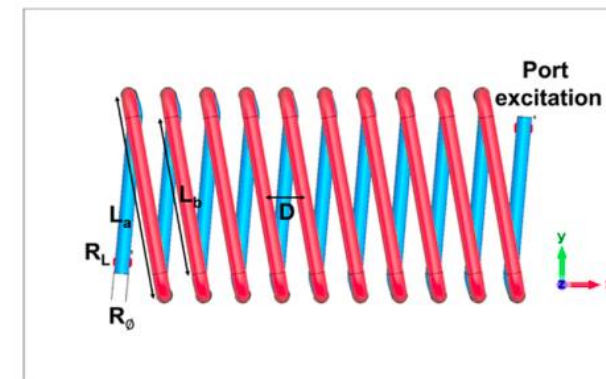


(d) Boundary condition and port excitation setting

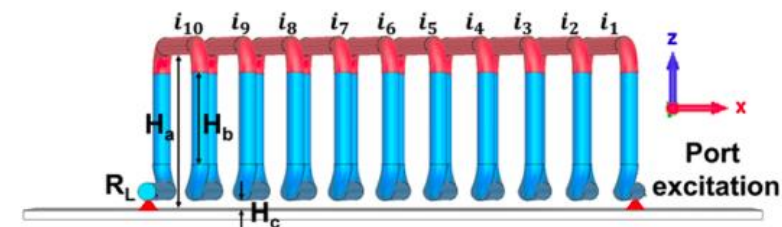
Fig. 5. Conceptual simplified RF design model (step 2).



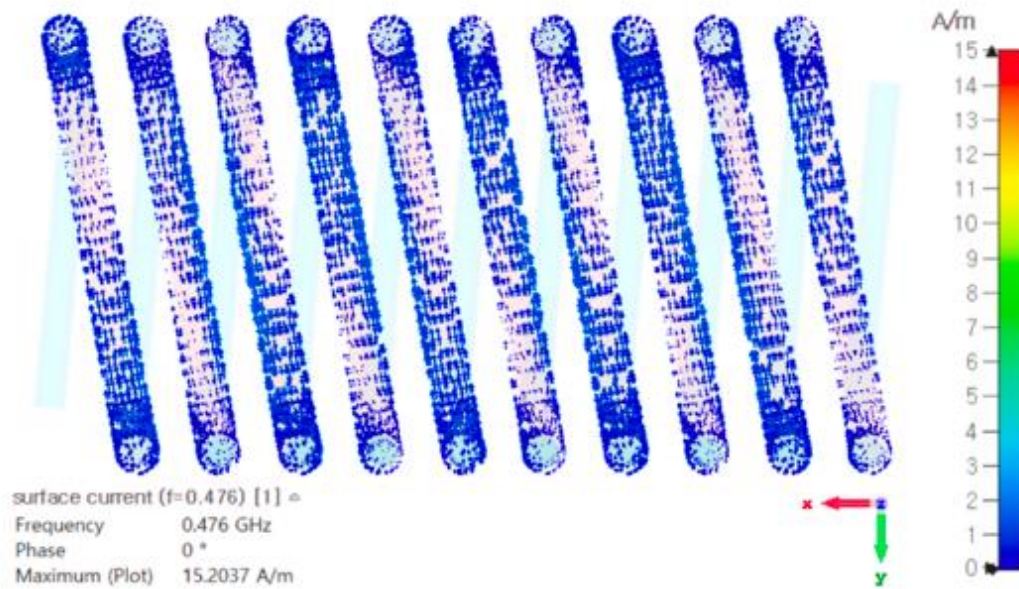
(a) 3D structural view



(b) Top view



(c) Elevation view



(a) Current distribution of simplified RF model

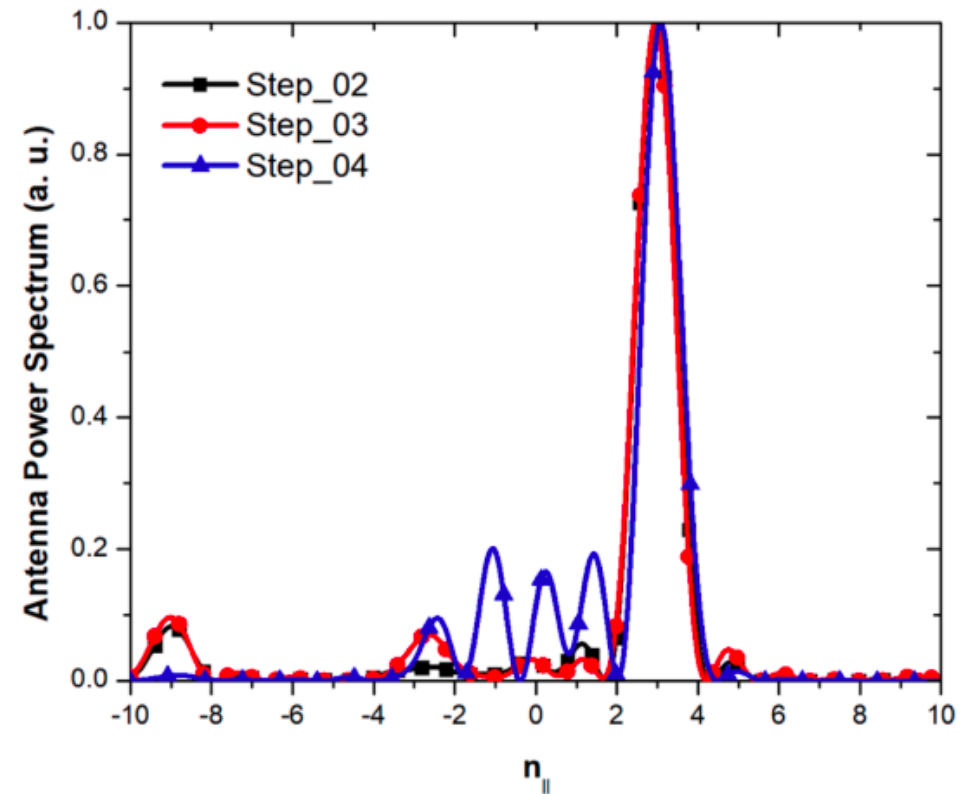


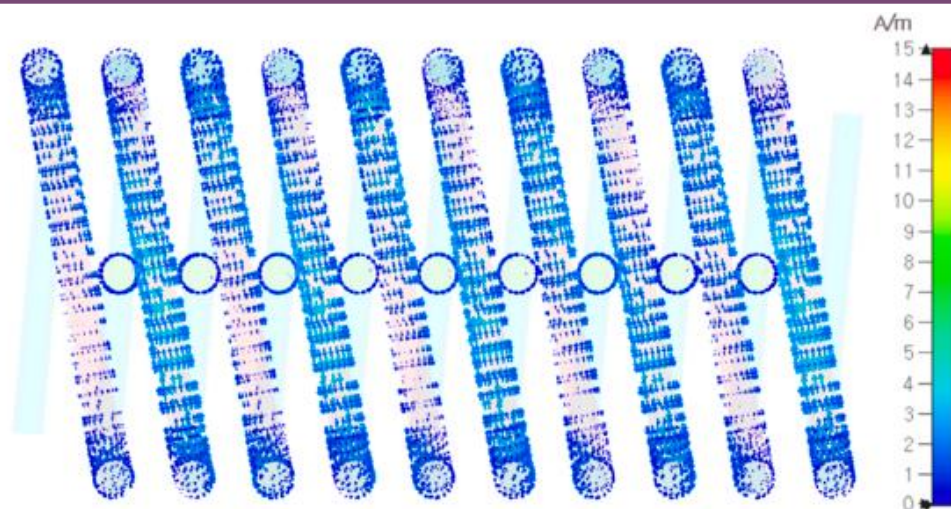
Fig. 10. n_{\parallel} power spectrum.

- 인접한 소스 간에 90도 위상차가 있으며, $n_{\parallel} = 3$ 에서 최대값을 갖는 고지향성 저측파대 스펙트럼이 관찰됨.
- n_{\parallel} 을 계산하기 위해, 전력 스펙트럼은 전기장의 y-구성 요소를 사용하여 평가되었으며, 이는 전류원 위 10mm에 위치한 평가선에서 계산되었다.
- 이후부터 논문에서 삽입한 n_{\parallel} power spectrum의 양상이 $n_{\parallel} = 3$ 에서 최대를 가지며 동일하므로 이미지 생략.

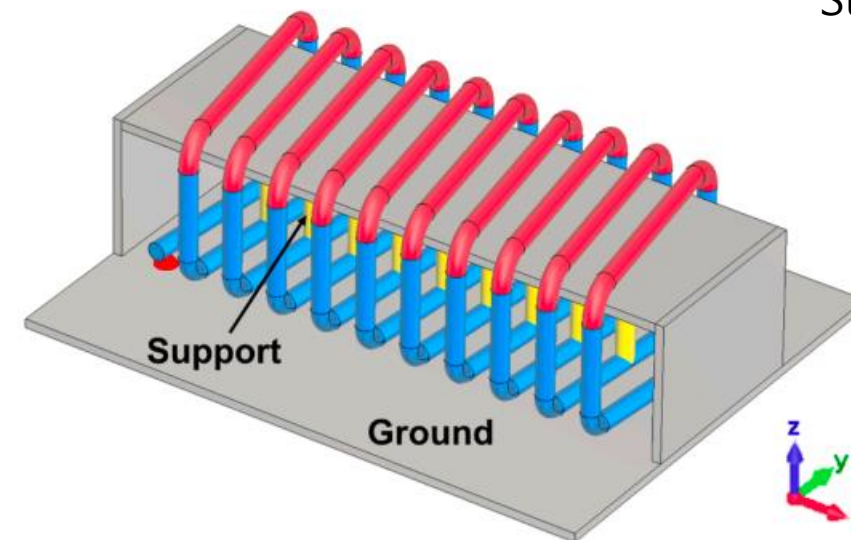
Helical LW-TWA의 개념적 RF 설계

Step_03

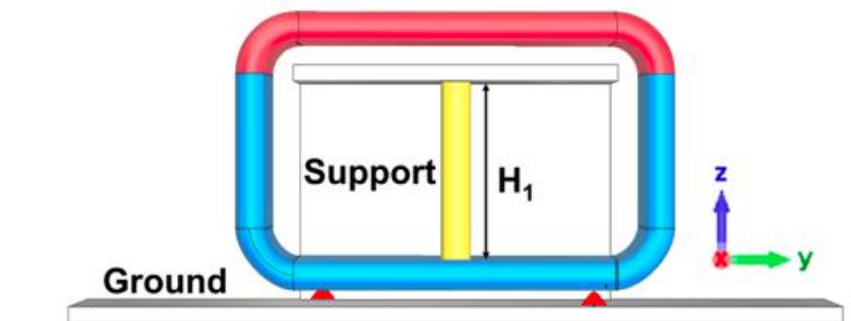
1. 그림 5 구조에서 접지 크기를 수정하고 지지 구조를 추가한 것이 그림 7 이다.
 - 접지 크기: 800×500 에서 640×500 으로 조정
 - 긴 와이어와 동일한 직경 20mm의 지지 구조를 도입하여 구조적 강성을 높인다.
2. $n_{||}$ 파워 스펙트럼 분석 결과, $n_{||} = 3$ 에서 최대값을 보이며 초기 설계와 일치한다.



(a) Current distribution



(a) 3D structural view



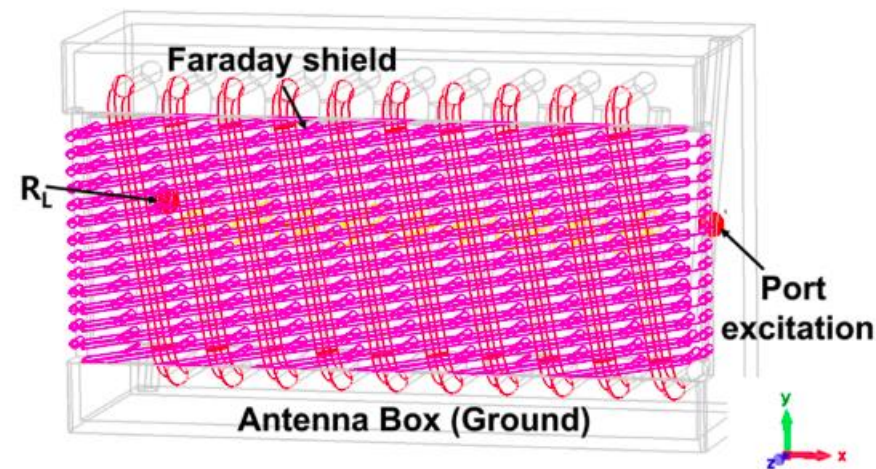
(b) Side view

Fig. 7. Conceptual simplified RF design model (step 3).

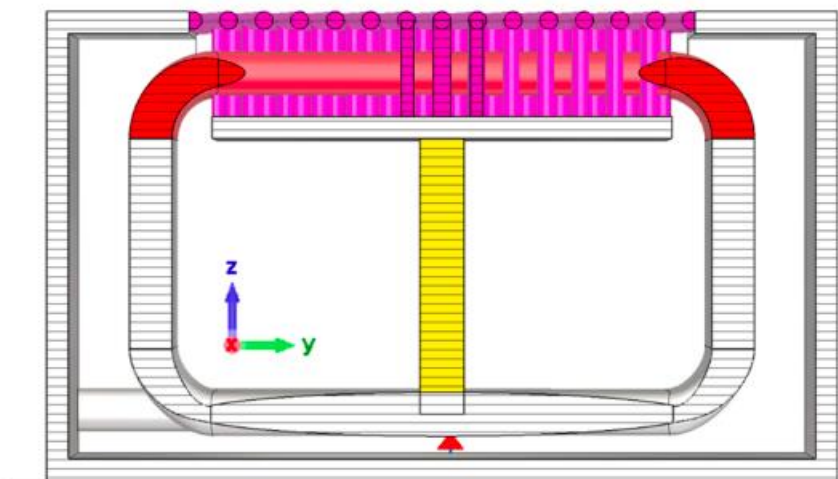
Step_04

Helical LW-TWA의 개념적 RF 설계

- 그림 7 구조에서 접지 크기를 수정하고 지지 구조를 추가한 것이 그림 9 이다.
 - 안테나의 크기: 600mm × 361mm × 214mm로 변경 (KSTAR 진공 용기가 할당된 공간을 고려)
 - 패러데이 실드를 추가하여 자기장과 정렬하여 고속파 성분의 전기장을 발사
 - 피더 및 종단 저항의 구조는 그림 9와 같이 변경
└ 직렬 연결 -> 병렬 연결: 종단 저항 값 RL이 50옴으로 감소.



(a) 3D structural view



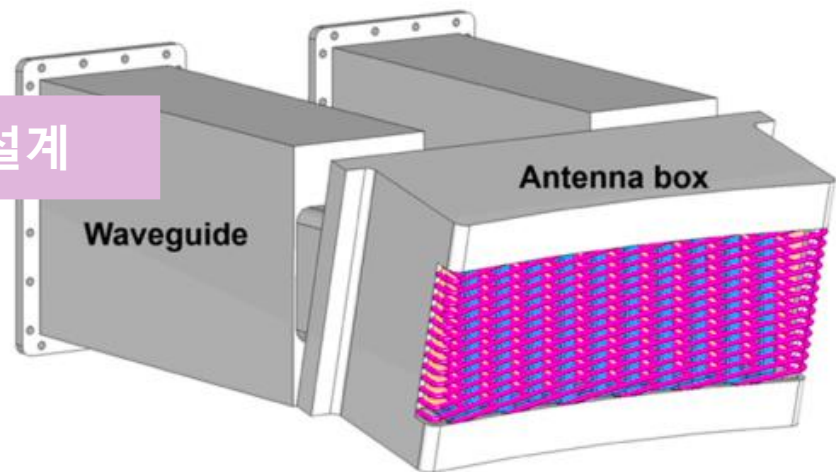
(b) Side view

Fig. 9. Conceptual simplified RF design model (step 4).

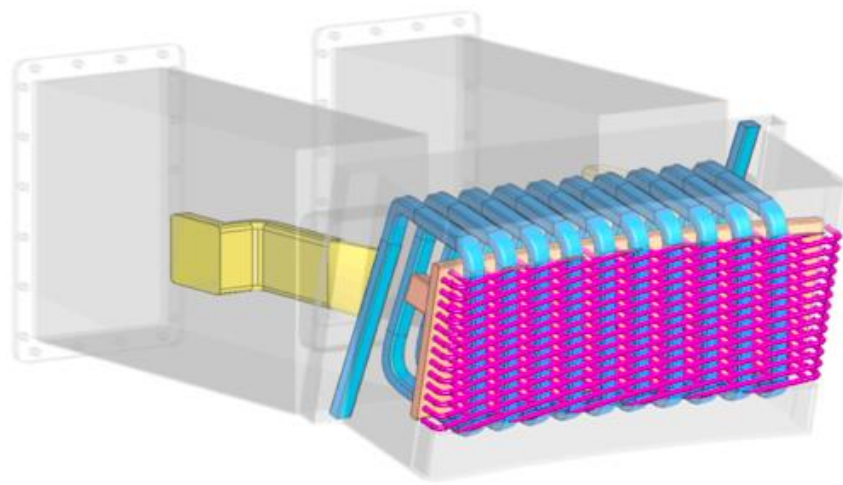
Helical LW-TWA의 RF 설계

Fig. 11. RF Structure of the helical LW-TWA.

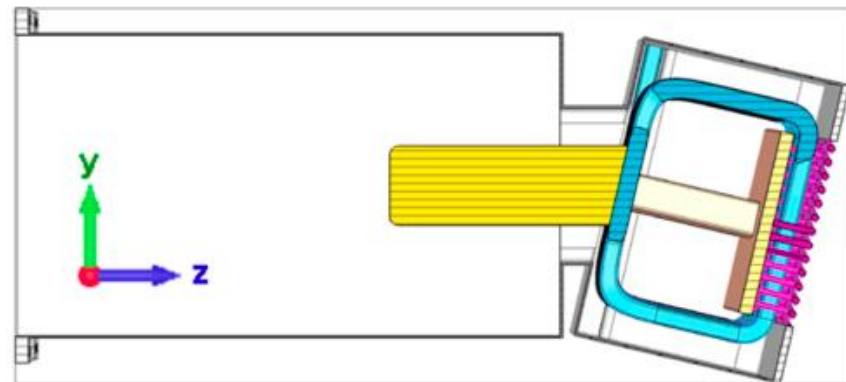
- 이전의 콤팩트 기반 TWA와 유사하게 이 설계는 **토로이드 방향의 플라즈마 곡률**을 고려한다.
- 그러나 폴로이드 방향의 곡률은 설계 및 제작 프로세스를 단순화하기 위해 포함되지 않는다.



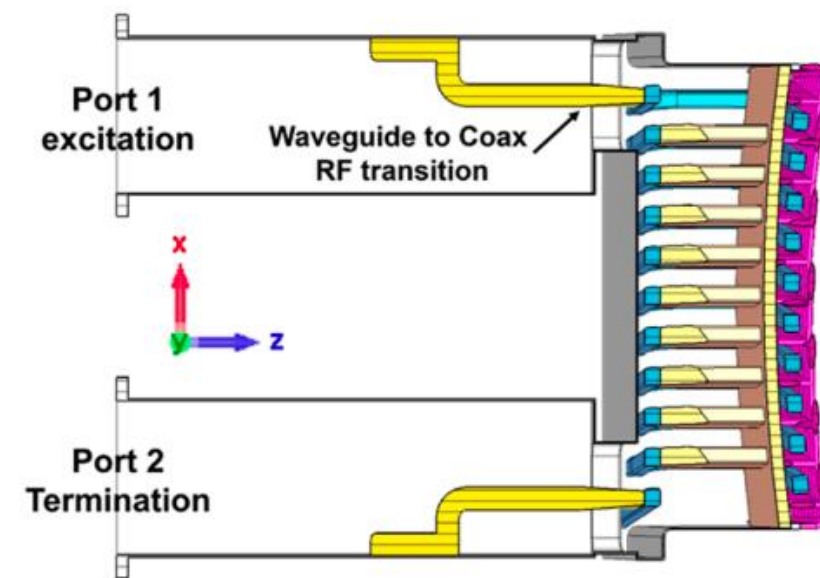
(a) 3D structural view



(b) 3D structural view with transparent antenna box



(c) Side view

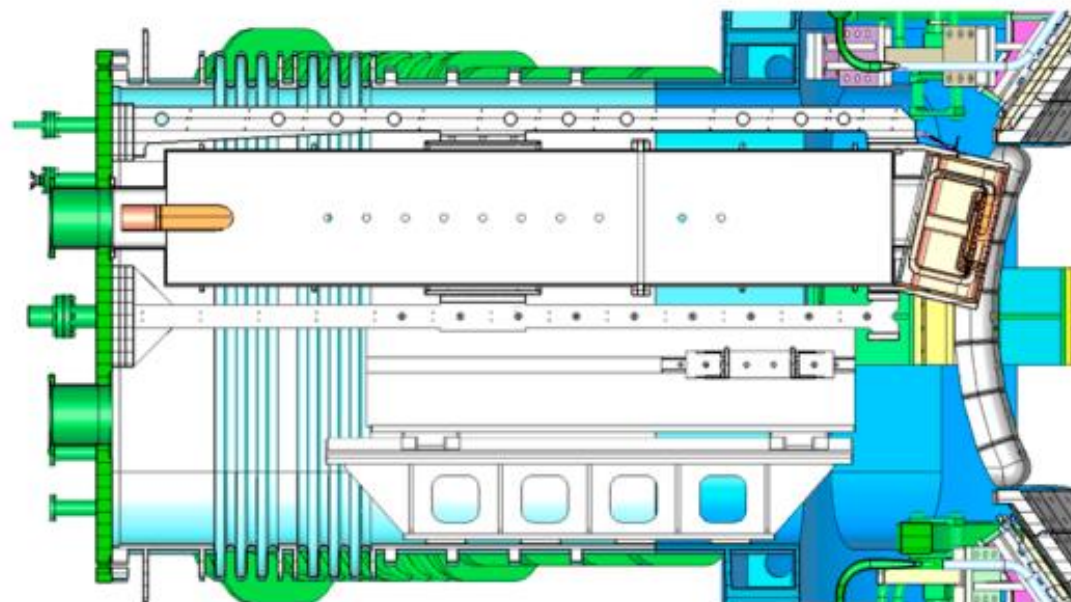


(d) Top view

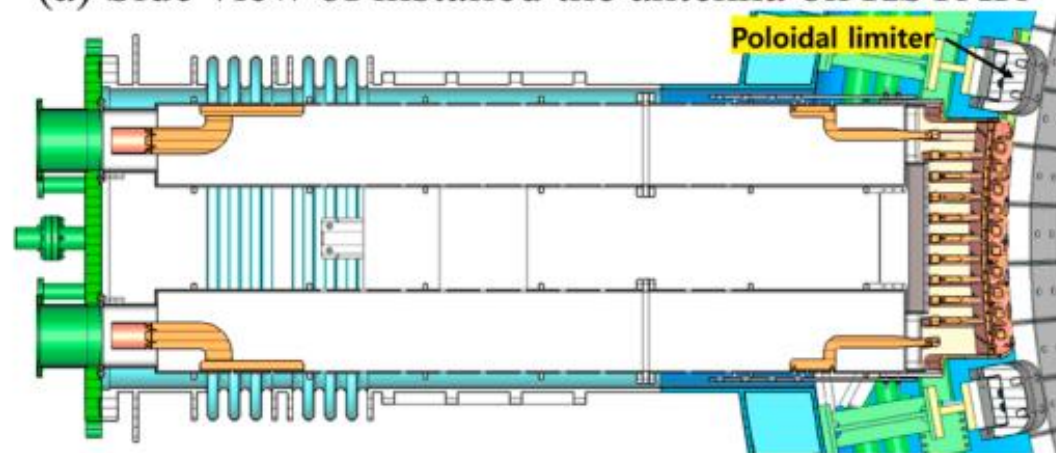
Helical LW-TWA의 RF 설계

Fig. 14. Installation of the antenna on KSTAR.

- 공급 섹션에서 전기장을 줄이기 위해 동축 외부 도체의 크기를 확대하여 그림 14(b)와 같이 안테나의 좌우에 있는 폴로이달 리미터와의 간섭을 피했습니다.



(a) Side view of installed the antenna on KSTAR

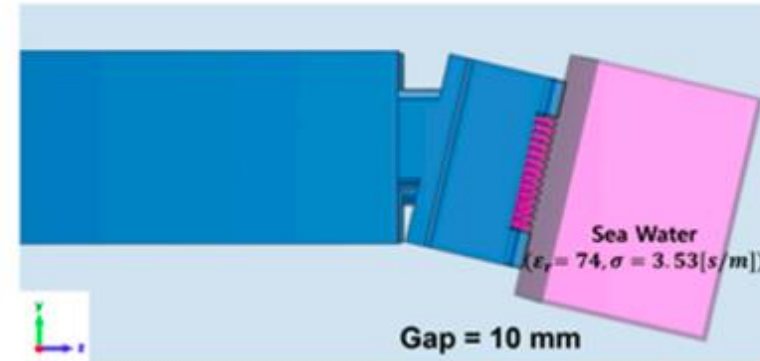


(b) Top view of installed the antenna on KSTAR

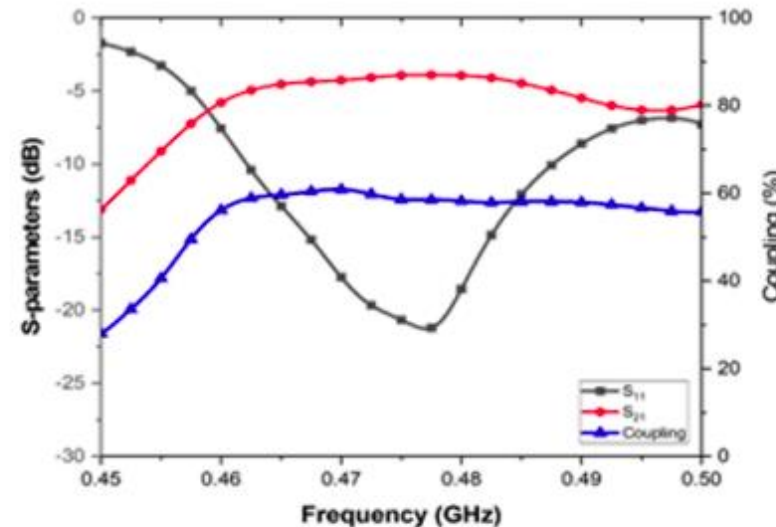
Helical LW-TWA의 RF 설계

- 그림 12(a)와 같이 단순화된 플라즈마 모델을 사용하여 안테나와 플라즈마 간의 결합 및 흡수를 조사했다.
 - 1350mm × 545mm × 500mm의 크기
- S-매개변수와 전력 결합 결과는 그림 12(b)에 표시되어 있으며, 476MHz에서 S_{11} 은 -21dB, S_{21} 은 -3.9dB, 전력 결합은 59%임을 나타낸다. 전력 결합은 S-매개변수를 사용하여 결정되며 식 (2)를 사용하여 계산됩니다.

$$\text{Power Coupling} = (1 - (|S_{11}|^2 + |S_{21}|^2)) \times 100$$



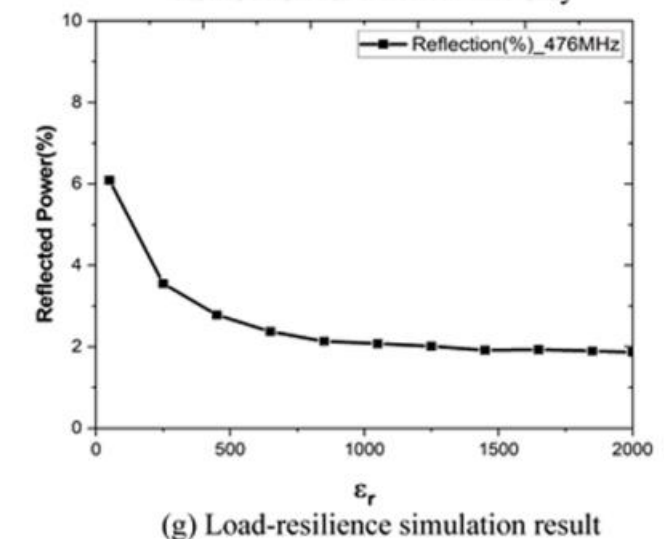
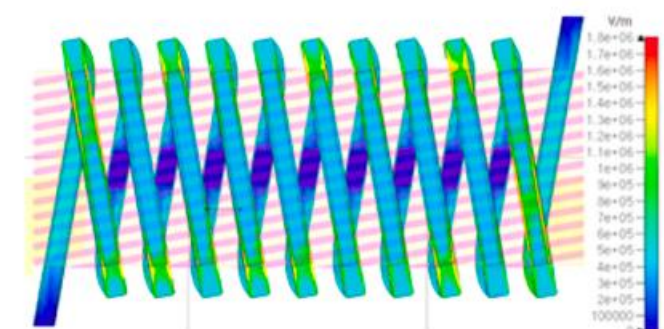
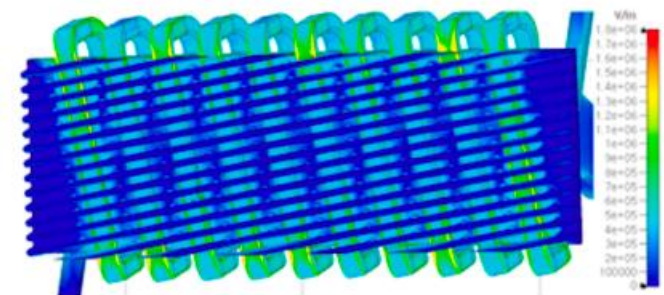
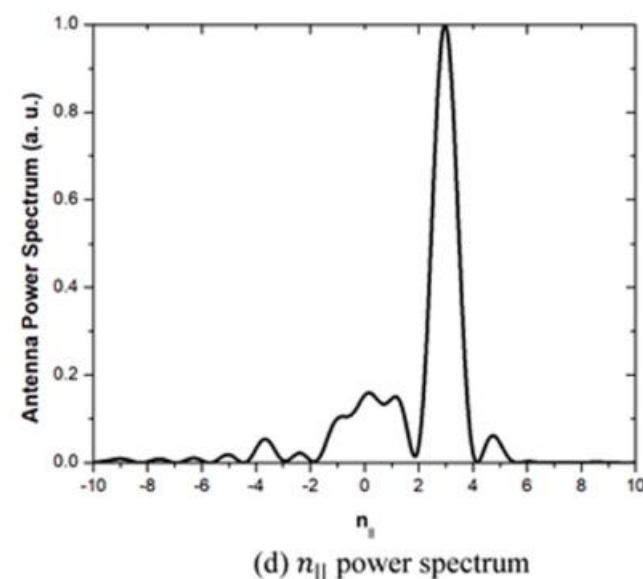
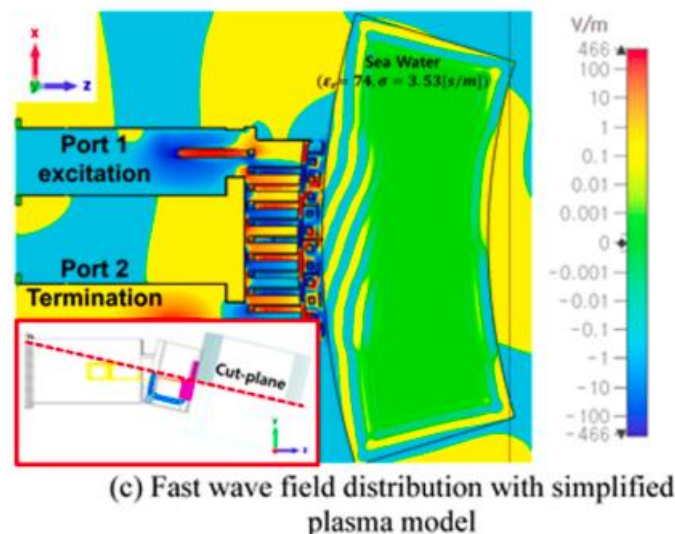
(a) RF simulation condition with simplified plasma modeling



(b) S-parameters (dB) and power coupling (%)

Summary

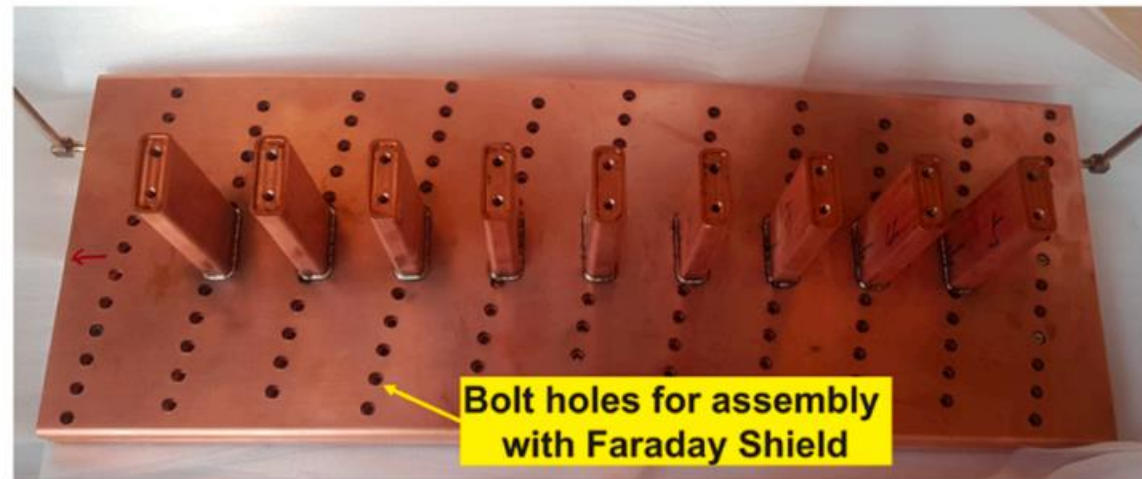
1. 그림 12(c)는 단순화된 플라즈마 모델에 수직으로 배향된 절단 평면에서의 필드를 나타내며, 빠른 파동 성분을 보여준다.
2. 시뮬레이션 결과는 단순화된 플라즈마 모델에 의해 이 성분이 흡수되는 방향성 전파를 강조한다.
3. 입력 전력이 1MW일 때 최대 필드는 17kV/cm입니다. 전체적으로 균일한 필드 분포를 유지하여 이전 combline 기반 TWA 설계에 비해 필드를 상당히 줄인다.
4. 비교적 낮은 전계와 균일성은 전계 특성에 전기적으로 개방된 지점이 없고 TWA 자체가 낮은 VSWR을 유지하기 때문에 달성할 수 있다.
5. 그림 12(g)는 플라즈마 모델인 해수의 유전율을 10에서 2000까지 변화시켜 안테나에서 반사된 전력 비율을 시뮬레이션한 것을 보여준다.
6. 반사된 전력 비율은 7% 미만으로 낮게 유지되며, 최소한의 추가 매칭 구성 요소로 안정적인 방식으로 작동할 수 있다는 것을 의미한다.



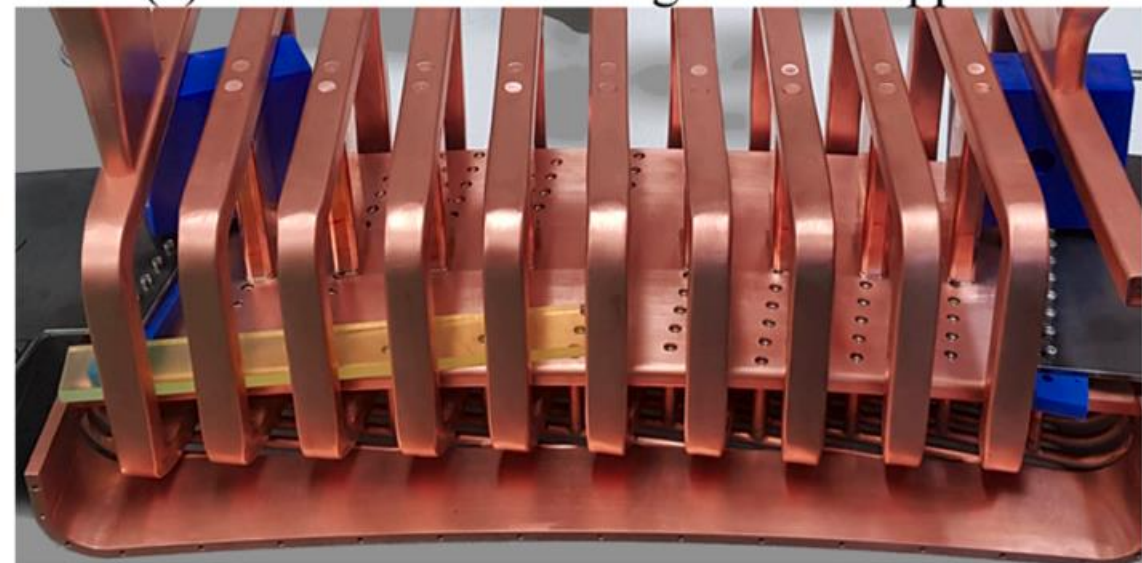
LW-TWA 제작

1. 나선형 TWA의 주요 구성 요소(안테나 상자, 피더, 패러데이 실드, 나선형 라인, 지지대)는 무산소 고전도 구리(OFHC)를 사용하여 제작한다.
2. 패러데이 실드는 플라즈마 침식으로부터 추가 보호를 위해 50 μ m 두께의 텅스텐 층으로 코팅된다.
3. 안테나의 스테인리스 스틸 프레임은 보강 및 향상된 강도로 설계되어 구조적 무결성과 내구성을 보장한다.
4. 토로이드 지지 구조는 그림 13©에 나와 있는 것처럼 내부 수냉 채널이 있는 두 섹션으로 나뉜다.
5. 전체 구조와 진공 씸의 포트 플랜지가 진공 용기 외부에서 조립 및 테스트한 후 KSTAR 토카막으로 밀어 넣을 수 있다.

➤ 토로이드 지지 구조에 수냉 채널을 포함시키는 계획이 진행 중이며, 이는 향후 CW 작동의 성능을 향상시키는 것을 목표



(c) Photo of water leakage test of support



(d) Photo of the fabricated assembly of LW-TWA