

# 캡스톤 설계 최종 보고서

팀명	캡스톤 설계 2팀							
지도교수	오성욱		주제명	핵융합 발전을 위한 고효율 플라즈마 가열 안테나 설계				
학번	이름	공헌도	전화번호	이메일				
2020742062	정은지	33.3 %	010-8596-9368	eunjijung1107@gmail.com				
2019742005	유동욱	33.3 %	010-9016-5185	avanet9479@kw.ac.kr				
2019742016	김태민	33.3 %	010-4164-3961	steve3588@naver.com				
수행기간	2024. 09. ~ 2024. 11.		예산 총액	0				
요약 동기 및 필요성 연구 내용 기대 효과 (500자 내)	<p>본 연구에서는 “핵융합 발전을 위한 고효율 플라즈마 가열 안테나”라는 주제로 Parallel Refractive Index 개념을 바탕으로 하여 CST Simulation 기반으로 Comblin Antenna, Helical Antenna 라는 안테나를 활용해서 기존 안테나의 성능을 분석 및 성능 향상을 목표로 하여 설계를 하고자 한다.</p> <p>두 가지 형태(Comblin, Helical)의 핵융합 발전을 위한 고효율 플라즈마 가열 안테나 설계를 진행하며 어느 유형의 안테나가 플라즈마 가열 안테나에 더 적합한지 비교 분석이 가능할 것이라 기대된다. 또한, 플라즈마 가열이라는 새로운 분야에서의 안테나의 활용도 및 기술의 성장을 예측할 수 있다.</p>							
최종 목표	<div>○ 정성적 최종 목표</div> <div>◆ 핵융합 발전을 위한 고효율 플라즈마 가열 안테나 설계</div> <div>○ 정량적 최종 목표</div> <div>◆ Comblin Antenna</div> <table><tr><td>구조</td><td>폭이 600mm인 Ground box를 기준으로 Current Strap의 형태를 이용하여 Coupling의 원리로 전류가 전달이 되어 플라즈마 가열 안테나의 역할을 하도록 설계</td></tr><tr><td>성능</td><td>0.475GHz에서 <math>S_{11} &lt; -15dB</math>, <math>S_{21} &gt; -0.5dB</math> 의 조건을 만족하면서 Strap 부분에서 발생하는 Maximum E-field의 값을 최소화 하도록 설계</td></tr></table> <div>◆ Helical Antenna</div>				구조	폭이 600mm인 Ground box를 기준으로 Current Strap의 형태를 이용하여 Coupling의 원리로 전류가 전달이 되어 플라즈마 가열 안테나의 역할을 하도록 설계	성능	0.475GHz에서 $S_{11} < -15dB$ , $S_{21} > -0.5dB$ 의 조건을 만족하면서 Strap 부분에서 발생하는 Maximum E-field의 값을 최소화 하도록 설계
구조	폭이 600mm인 Ground box를 기준으로 Current Strap의 형태를 이용하여 Coupling의 원리로 전류가 전달이 되어 플라즈마 가열 안테나의 역할을 하도록 설계							
성능	0.475GHz에서 $S_{11} < -15dB$ , $S_{21} > -0.5dB$ 의 조건을 만족하면서 Strap 부분에서 발생하는 Maximum E-field의 값을 최소화 하도록 설계							

	구조	가로 600mm, 세로 361mm인 Faraday shield를 기준으로 쉼드 내부에 있는 스쿼어 나선 형태의 안테나가 플라즈마 내부로 에너지를 전달하는 형태로 설계
	성능	0.475GHz에서 $S_{11} < -20dB$ , $S_{21} > -4dB$ 의 조건을 만족하면서 power coupling을 59% 이상으로 효율을 내는 것을 목표

가. 연구의 필요성

최근 다양한 기술의 발전은 사람들로 하여금 다양한 편의를 제공하고 있다. 그 중에서도 특히 안테나는 휴대폰, 위성 통신, GPS 등 현대 기술의 많은 부분이 의존하는 개념 중 하나이다.

본 연구에서는 안테나의 위와 같은 다양한 분야 중에서 “핵융합 발전을 위한 고효율 플라즈마 가열 안테나”라는 주제로 프로젝트를 진행한다.

원하는 정량적 목표를 달성한 안테나를 활용하여 진공(Vacuum(기존)) 형태의 물체와 플라즈마를 해수(Seawater)로 적용하여 만든 형태의 물체를 상대로 안테나를 작동했을 때 성능의 측면을 중점으로 차이점을 분석하고 이 과정을 통해서 “핵융합 발전을 위한 고효율 플라즈마 가열 안테나 설계”에 적합한 안테나를 제작하고자 한다.

나. 연구 목표 및 방법

A. 연구 목표

구분	내용	
최종 목표	◆ 핵융합 발전을 위한 고효율 플라즈마 가열 안테나 설계	
세부 목표 및 내용	◆ Comblne Antenna	
	구조	폭이 600mm인 Ground box를 기준으로 Current Strap의 형태를 이용하여 Coupling의 원리로 전류가 전달이 되어 플라즈마 가열 안테나의 역할을 하도록 설계
	성능	0.475GHz에서 $S_{11} < -15dB$ , $S_{21} > -0.5dB$ 의 조건을 만족 하면서 Strap 부분에서 발생하는 Maximum E-field의 값을 최소화 되도록 설계
	◆ Helical Antenna	
	구조	가로 600mm, 세로 361mm인 Faraday shield를 기준으로 쉘드 내부에 있는 스쿼어 나선 형태의 안테나가 플라즈마 내부로 에너지를 전달하는 형태로 설계
	성능	0.475GHz에서 $S_{11} < -20dB$ , $S_{21} > -4dB$ 의 조건을 만족 하면서 power coupling을 59% 이상으로 효율을 내는 것을 목표

## B. 연구 방법

본 연구는 CST tool을 사용하여 진행되었다. 안테나 성능 평가 지표인  $n_{\text{parallel}}$ 과 directivity를 출력하기 위해 Visual Studio Code 와 매트랩 등 부가적인 tool을 활용하였다.

### 기반 이론(안테나)

#### ● 헬리컬 안테나(Helical Antenna)

- 헬리컬 안테나는 금속 와이어를 코일 형태로 감아 제작된 안테나로, 주로 나선형 구조를 갖는다. 이 안테나는 방사 모드에 따라 노멀 모드(Normal Mode)와 축방향 모드(Axial Mode)로 나뉘며, 다음과 같은 특징이 있다. 연구에서 사용된 모드는 Axial Mode이다.

- ◆ 노멀 모드(Normal Mode): 나선의 반경과 길이가 작은 경우, 방사 패턴이 안테나 축에 수직 방향으로 이루어진다. 비교적 낮은 주파수에서 사용된다.
- ◆ 축방향 모드(Axial Mode): 나선의 길이가 파장에 비례해 크며, 방사 패턴이 안테나 축 방향으로 이루어지는 모드이다. 주로 고이득과 원형 편파(Circular Polarization)가 필요한 통신 시스템에서 사용된다.
- 헬리컬 안테나는 위성 통신, 라디오 주파수 응용, 우주 탐사 등의 분야에서 널리 활용됩니다.

#### ● 컴블라인 안테나(Comblain Antenna)의 정의

- 컴블라인 안테나는 서로 간격을 둔 병렬 금속 스트립(또는 튜브)과 커패시터로 구성된 주기적인 배열을 특징으로 하는 안테나이다. 주로 선형 배열(Linearly Arrayed Structure)로 설계되며, 다음과 같은 특징이 있다.
- ◆ 주로 대역통과 필터와 유사한 구조로 설계되며, 특정 주파수 대역에서 높은 효율을 보인다.
- ◆ 소형화와 높은 주파수 안정성을 갖추고 있으며, 주파수 선택성이 뛰어나다.
- 고지향성 특성을 가져 레이더 시스템, 고출력 전송, 고주파 RF 시스템 등에 사용된다.
- 컴블라인 안테나는 소형화와 대역폭 제어가 중요한 현대 통신 시스템과 고출력 전송 시스템에서 널리 활용됩니다.

## 다. 연구 결과

### 가) 세부 목표별 연구 결과

#### □ Comblain Antenna 설계

##### 목표설정

476MHz 주파수 대역에서  $S_{11} < -15\text{dB}$ ,  $S_{21} > -1\text{dB}$ 로 최소한의 반사와 최대의 전송이 이루어지게 S-parameter값 설정

$n_{\text{ll}}(\text{Parallel Refractive Index}) = 3$

기존 KFE Reference 자료에서 Faraday Shield 부분을 수정하여 높은 Directivity값을 설정

##### 설계과정

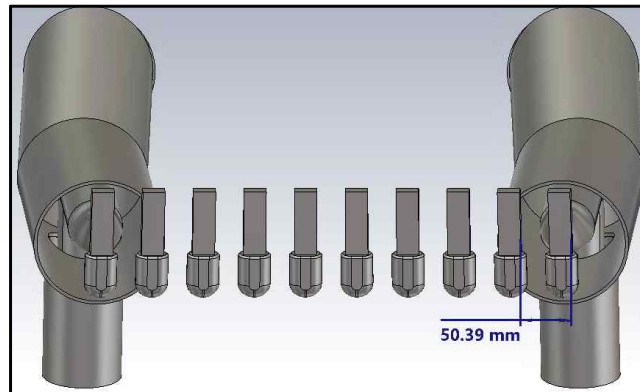
##### KFE reference

- 1) 기존 KFE Reference 자료에서는 인접한 Current Strap의 전류원 사이의 위상차를  $90^\circ$ 로 설계하였음.
- 2) 476MHz 주파수 대역에서 아래의 관계식을 바탕으로  $n_{\text{ll}}$  값이 3으로 하기 위해서 50mm 간격(D)마다 위상차  $90^\circ$ 가 되도록 설계

$$n_{\text{ll}} = c \frac{k_{\text{ll}}}{\omega} \approx \frac{\Delta\phi}{D} \times \frac{c}{2\pi f} \quad (1)$$

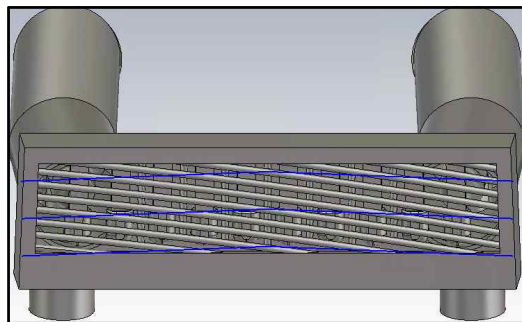
- 3) 안테나에서 방사된 파의 Parallel Refractive Index  $n_{\text{ll}}$  은 식 (1)로 표현될 수 있으며, 아래 그림과

같이 D=50mm는 인접한 Strap 간의 동일한 위치에서 위상차 90°가 되도록 함



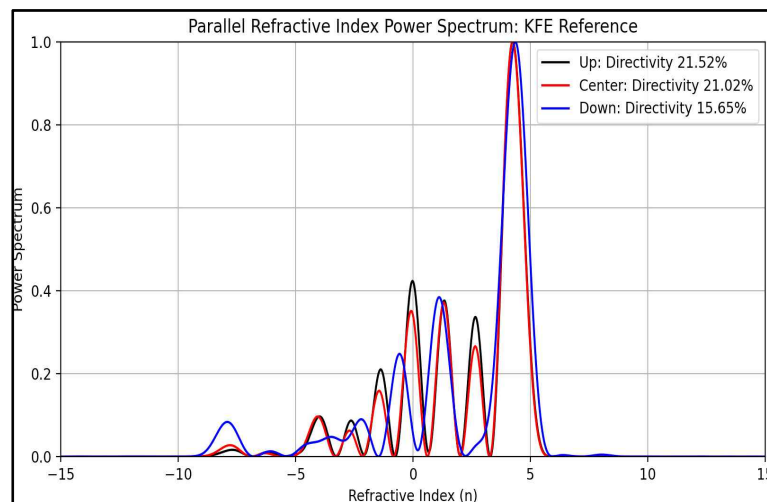
<KFE Reference의 인접한 Strap 간의 동일한 위치>

- 4) Curve의 위치에 따라 nll값과 Directivity값을 보기 위해서 아래와 같이 Gap = 10mm를 두고 Center, Up, Down 세 곳을 나누어 측정하였음



<KFE Reference Curve>

- 5) Up, Center, Down의 nll 값은 각각 4.26, 4.24, 4.36으로 아래의 그래프와 같은 형태를 가짐

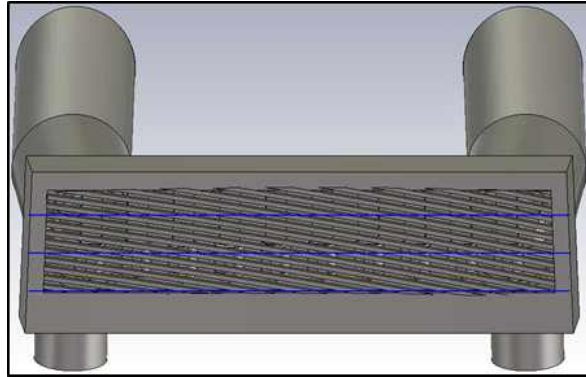


<KFE Reference Curve 별 nll>

KWU

- 1) 기존 KFE Reference 자료와 동일하게 476MHz 주파수 대역에서 식 (1)의 수식에 근거하여 인접한 Current Strap의 전류원 사이 50mm 간격(D) 마다 위상차 90°를 기준으로 하여 설계
- 2) Faraday Shield 구조(간격, 두께, Faraday Shield 부분의 Ground box 등)를 수정하여 CST의 Optimizer 기능을 활용하여 목표설정으로 정한 조건들을 기준으로 설계

### 3) Faraday Shield 구조 수정 & Curve를 설정한 KWU's Comblin Antenna



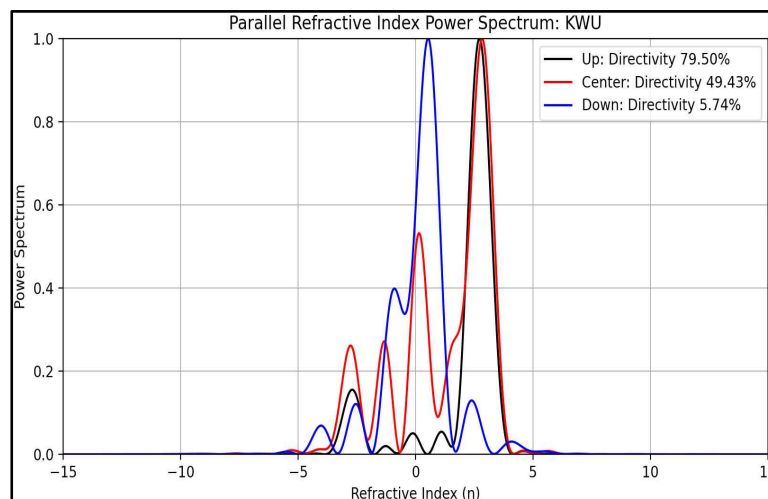
<KWU's Comblin Antenna Curve>

- 4) KFE Reference 파트에서 언급한 인접한 두 Strap 50mm 간격마다 Surface current의 Phase 값을 1D 형식으로 추출하고, 추출된 값을 Peak-Peak를 적용하여 두 값을 비교
- 5) Peak-Peak를 Optimizer Goal로 설정하여 위상차 90°가 되도록 함

ID	Type	Operator	Target	Range	Weight
0	1DC: \S-Parameters\S1,1	<	-15	0.476	1.7
1	1DC: \S-Parameters\S2,1	>	-2	0.476	1.7
2	1DC: \S-Parameters\S2,1	>	-5	0.47...0.48	1.5
3	TBPP 0D: surface current (f=0.476) (1)_Y (Z)_12_0D_PeakToPeak	=	90	-	2
4	TBPP 0D: surface current (f=0.476) (1)_Y (Z)_23_0D_PeakToPeak	=	90	-	2
5	TBPP 0D: surface current (f=0.476) (1)_Y (Z)_34_0D_PeakToPeak	=	90	-	2
6	TBPP 0D: surface current (f=0.476) (1)_Y (Z)_45_0D_PeakToPeak	=	90	-	2
7	TBPP 0D: surface current (f=0.476) (1)_Y (Z)_56_0D_PeakToPeak	=	90	-	2
8	TBPP 0D: surface current (f=0.476) (1)_Y (Z)_67_0D_PeakToPeak	=	90	-	2
9	TBPP 0D: surface current (f=0.476) (1)_Y (Z)_78_0D_PeakToPeak	=	90	-	2
10	TBPP 0D: surface current (f=0.476) (1)_Y (Z)_89_0D_PeakToPeak	=	90	-	2
11	TBPP 0D: surface current (f=0.476) (1)_Y (Z)_910_0D_PeakToPeak	=	90	-	2

<Faraday Shield 최적화를 위한 Goal 설정>

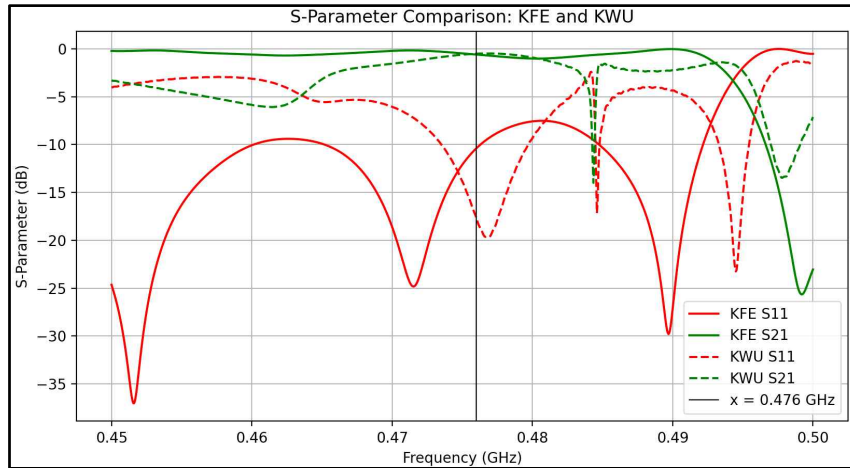
- 6) Up, Center, Down의 nll 값은 각각 2.73, 2.83, 0.52로 아래의 그래프와 같은 형태를 가짐



<KWU's Comblin Antenna Curve 별 nll>

## KFE reference & KWU

### 1) S- parameter



### <KFE와 KWU의 S-parameter 비교>

2) S-parameter는 S21은 비슷하지만, S11은 KWU가 KFE보다 근소하게 좋고, KWU의 경우  $S_{11} < -15\text{dB}$ ,  $S_{21} > -1\text{dB}$ 를 만족

### 3) KFE vs KWU

version	$S_{11}$	$S_{21}$	Maximum E-field	position of curve	$n_{ll}$	Directivity
KFE	-10.39dB	-0.59dB	346.66kV/cm	Up	4.26	21.52%
				Center	4.24	21.02%
				Down	4.36	15.65%
KWU	-25.45dB	-0.58dB	137.88kV/cm	Up	2.73	79.5%
				Center	2.83	49.43%
				Down	0.52	5.74%

### 결론

KWU가 KFE Reference보다 S-parameter의 값이 목표에서 설정한 값에 맞는 것을 확인할 수 있었음  
 $n_{ll}$  값이 KWU인 경우가 원하는 값인 3에 더 가까운 것을 확인할 수 있었음  
 향후 Maximum E-field를 낮추고,  $n_{ll} = 3$ 에 더 맞출 수 있도록 설계 개선에 초점을 맞출 예정

## □ Helical Antenna 설계

### 목표설정

S11 < -15dB, S21 > -1dB로 최소한의 반사와 최대의 전송이 이루어지게 S-parameter값 설정

nll(Parallel Refractive Index) = 3

기존 KFE Reference 자료보다 더 많은 turn수로 높은 Directivity값을 얻음

### 설계과정

KFE reference (step2)

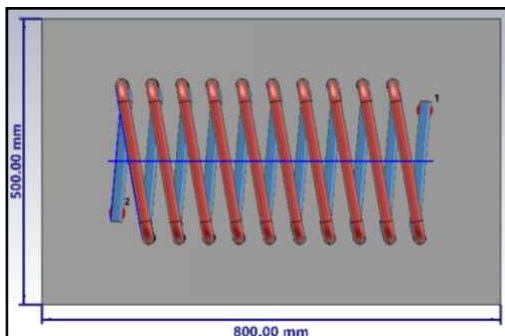
- 1) 기존 KFE Reference 자료에서는 인접한 Helical Line의 전류원 사이의 위상차를 90°로 설계하였음.
- 2) 위상차를 90°로 설계하기 위해서 Helical Line의 한 주기의 길이를 5/4파장(790mm)로 설계하였음.

$$n_{ll} = c \frac{k_{ll}}{\omega} \approx \frac{\Delta\phi}{D} \times \frac{c}{2\pi f} \quad (1)$$

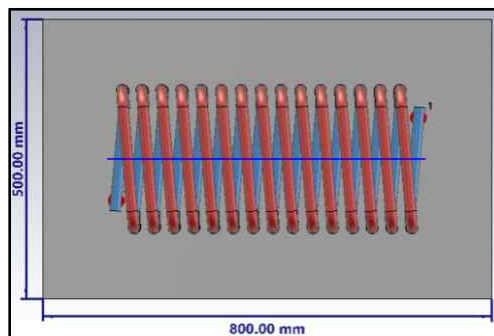
- 3) 안테나에서 방사된 파의 Parallel Refractive Index nll 은 식 (1)로 표현될 수 있으며, D=52mm는 KSTAR 헬리콘 전류 구동에 최적의 값 nll = 3을 만족하도록 결정됨.

KWU (step2)

- 1) 인접한 Helical Line의 전류원 사이의 위상차를 60°로 설계하였음.
- 2) Helical Line의 한 주기의 길이를 7/6파장(735mm)로 설계하였음.

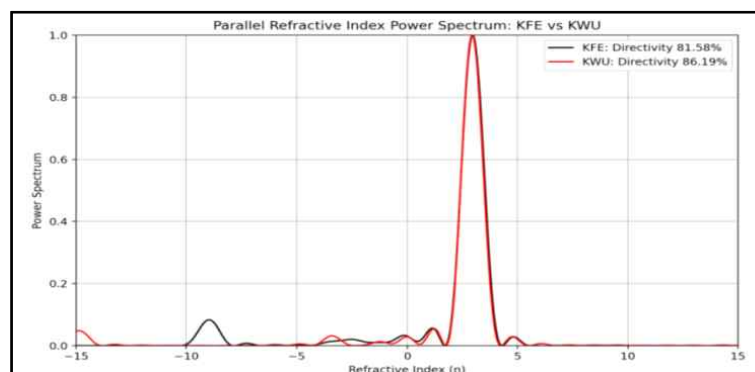


<KFE reference>



<KWU>

- 3) nll = 3을 만족시키기 위해 D=35mm로 설계하고, turn수를 5개 늘려 설계하였음.

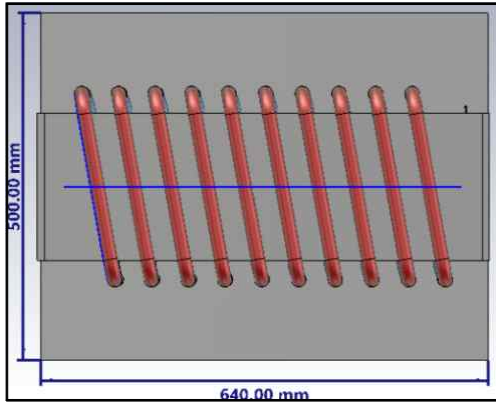


< nll power spectrum & Directivity(step2) >

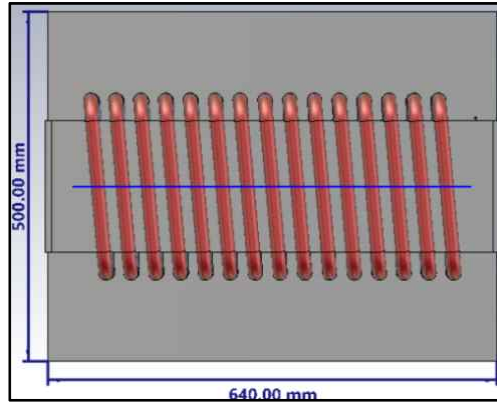
KFE reference & KWU (step3)

- 1) 기계적 강성을 강화하기 위해 각 Helical Line의 중간 지점에서 연결하는 구조가 도입 됨.
- 2) GND와 Helical Line을 연결하며, 길이가 1/4 파장으로 설계함으로써 열린 효과를 얻을 수 있음.

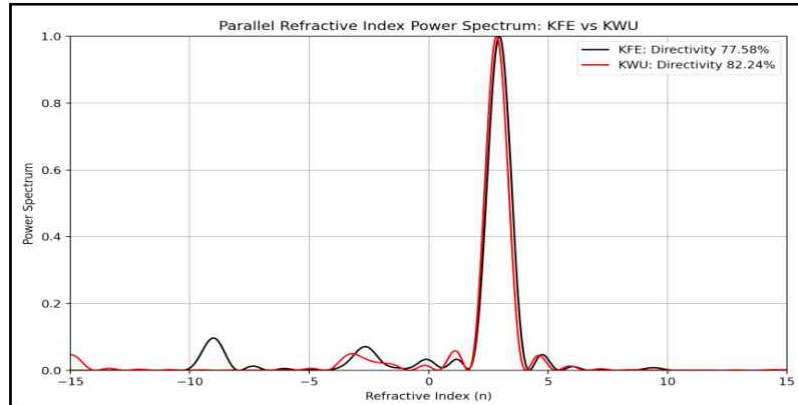




<KFE reference>



<KWU>



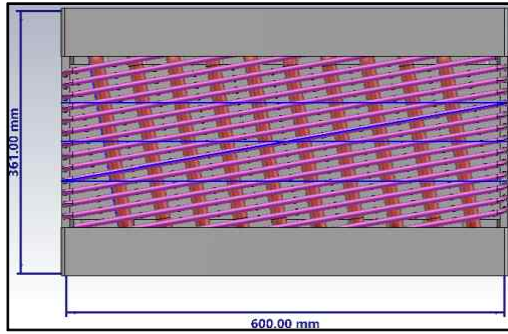
< nll power spectrum & Directivity (step3) >

KFE reference & KWU (step4)

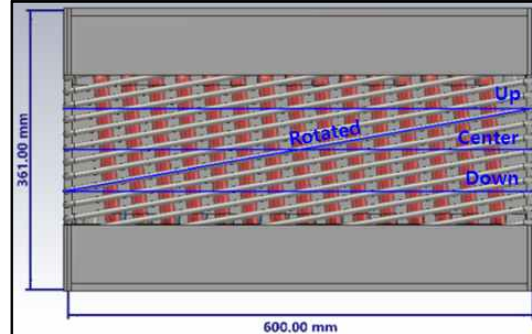
- 공간 제약을 고려하여 안테나의 크기를 600 mm × 361 mm로 축소하고, Faraday Shield를 추가하여 fast wave 성분의 E-field 방사를 촉진하였음.

version	$S_{11}$	$S_{21}$	MAX E-field	position of curve	$n_{ll}$	Directivity
KFE	-34.55dB	-0.35dB	32.8kV/cm	Center	3.17	58.85%
				Rotated	3.03	52.44%
				Up	3.18	55.07%
				Down	3.19	60.44%
KWU	-25.45dB	-0.58dB	99.68kV/cm	Center	3	70.03%
				Rotated	2.88	70.76%
				Up	3.02	69.14%
				Down	3.02	70.98%

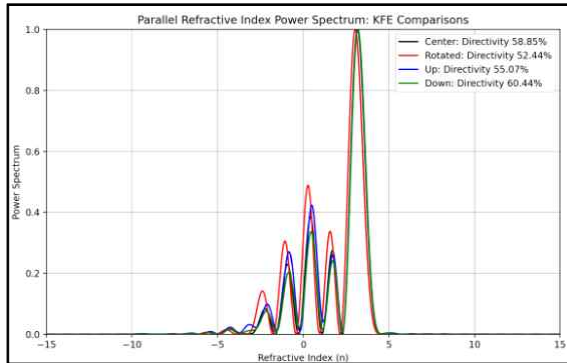
- curve의 위치에따른 nll값과 Directivity값을 보기 위해 center, rotated, up, down 네 곳을 나누어 측정하였음.



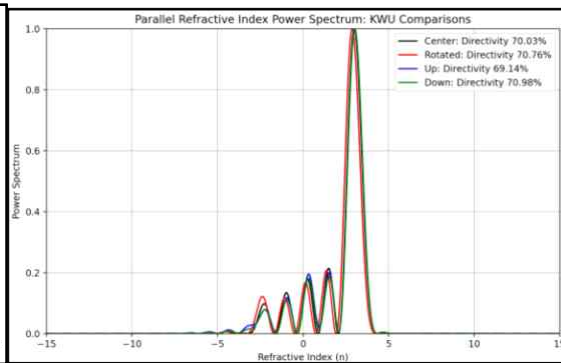
<KFE reference>



<KWU>

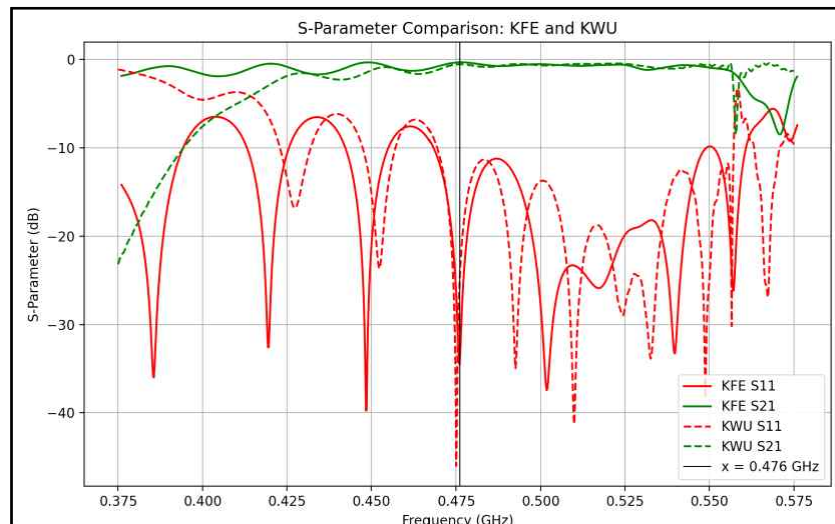


< curve 위치에 따른 nll값과 Directivity(KFE)>



< curve 위치에 따른 nll값과 Directivity(KWU)>

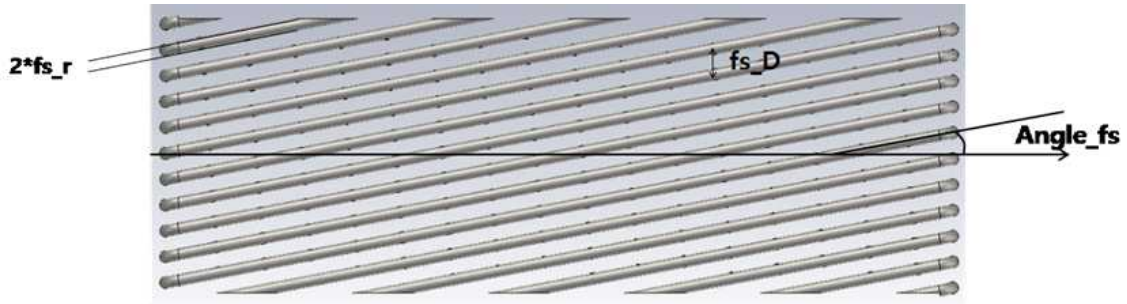
- 3) 전반적으로 KWU가 KFE보다 nll값이 3에 더 가깝고, Directivity값들이 더 높은 것을 확인 할 수 있음.



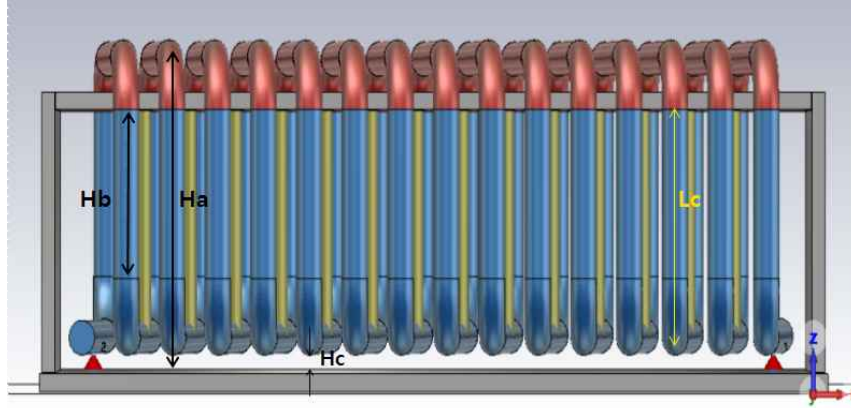
<KFE와 KWU의 S-Parameter 비교>

- 4) S-Parameter는 KFE가 KWU보다 근소하게 좋지만 두개의 안테나 모두 목표인  $S_{11} < -15\text{dB}$ ,  $S_{21} > -1\text{dB}$ 를 만족함.

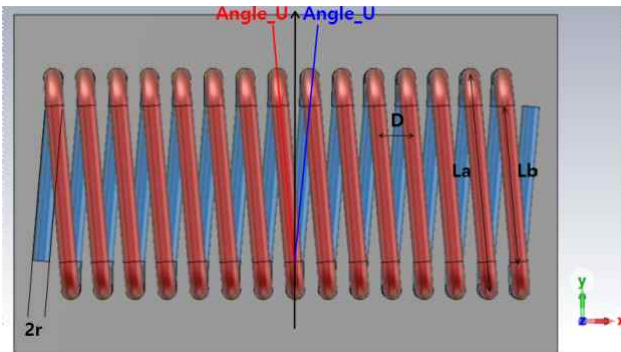
Parameter of KWU(step4)



<Faraday Shield>



<Elevation view>



<Top view>

item	KFE	KWU
La	270mm	244.5
Lb	210mm	164.5
Lc	126mm	130mm
Ha	166.4mm	170mm
Hb	96mm	96mm
Hc	10mm	10mm
D	52mm	35mm
r	10mm	10mm
fs_D	16mm	18mm
fs_r	4mm	4mm
Angle_U	10°	5°
Angle_D	5°	5°
Angle_fs	10°	10°

대부분의 파라미터들은 같지만, Helical Line의 길이인 La와 Lb에서 차이가 많이 나는 것을 볼 수 있음.

## 결론

KWU가 KFE reference보다 turn수가 많아 예상대로 높은 Directivity값을 보여주고 있음.

-15dB보다 낮은 S11, -1dB보다 높은 S21을 보이고 nll(Parallel Refractive Index) = 3을 만족시켜 설정한 목표를 달성함.

향후 Max E-field를 낮추기 위한 설계 개선에 초점을 맞출 예정.

## □ N\_parallel 및 Directivity 출력 VBA 코드 개발

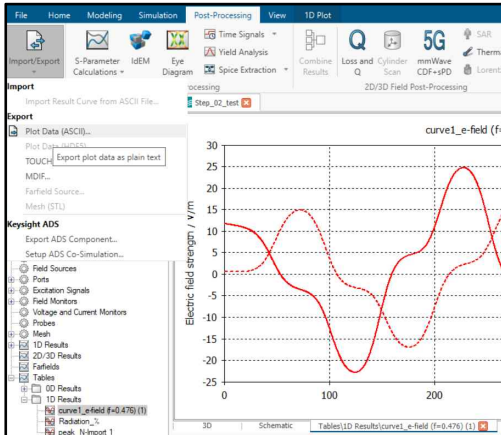
### VBA 코드 개발의 필요성

해당 정보를 출력하기 위한 기존의 과정은 3개의 플랫폼을 거쳐야 했다.

CST Studio에서 E-field 정보를 txt 형태로 추출하고, 그 자료에서 문자 정보를 수작업으로 제거해야 파이썬 코드를 통해 Peak N\_parallel과 Directivity 값을 구할 수 있었다.

CST에서 한 번 시뮬레이션을 돌릴 때마다 N\_parallel 및 Directivity 결과를 확인하기 위해서는 위의 과정을 반복해야 하는 번거로움이 있었기에 과정을 단축하고자 VBA 코드를 작성했다.

### CST Studio Suite 2024



E-field  
정보  
추출  
⇒

### EXCEL

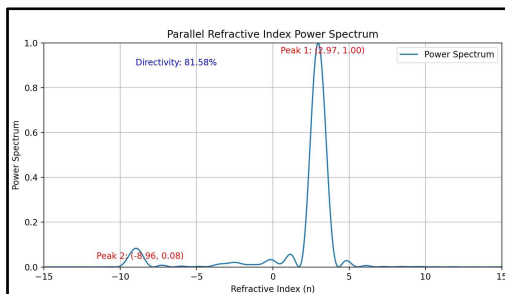
Column1	Column2	Column3
#Parameters = (Angle=10;	curve1_e-field (f=0.476) (1) [Re / V/m]	curve1_e-field (f=0.476) (1) [Im / V/m]
#Length / mm"		
4 #-----		
5 0.0000000000000000	11.715257644653	0.68385648727417
6 0.20071411132812	11.707765579224	0.68142473697662
7 0.40142822265625	11.700244903564	0.67895054817200
8 0.60214233398438	11.692724227905	0.67647522687912
9 0.80285644531250	11.685202598572	0.67399984958160
10 1.0035705566406	11.677663803101	0.67151486873627
11 1.20431515554569	11.670116424561	0.66902464632220
12 1.4050929268750	11.66256999695	0.66653484106064
13 1.6057434082031	11.655004501343	0.66403281686890
14 1.8064575195312	11.647408485413	0.66150897741318
15 2.0071716308594	11.639811515808	0.65898057833481
16 2.2078857421875	11.632212638855	0.65646111965179
17 2.4085998535156	11.624579429626	0.65393424034119
18 2.6093139648438	11.616947174072	0.65140730142593
19 2.8100280761719	11.609314918518	0.64888042211533
20 3.0107421875000	11.601629257202	0.64635431766510
21 3.2114562988281	11.593925476074	0.64382851123810
22 3.4122009277344	11.586220741272	0.64130228757858
23 3.612915009695	11.578492156452	0.63877694124447

문자 정보 제거



Visual Studio Code

### 그래프 결과



시뮬  
레이션  
←

```

14: def load_data():
15:     """Load data from a specific file without prompting the user."""
16:     file_path = "X:\Simulation\N_parallel\test\test1.txt" # Specify file path
17:     return pl.read_csv(file_path, comment='#', delimiter=';', header_rows=[1], names=['length_mm', 're_v/m', 'im_v/m'])
18:
19: def process_signal(data, freq=860, c=3):
20:     """Process the signal and return fft result and directivity."""
21:     complex_signal = data['re_v/m'].to_numpy() + 1j * data['im_v/m'].to_numpy()
22:     N = len(complex_signal)
23:     complex_signal = (data['length_mm'].iloc[0] - data['length_mm'].iloc[-1]) / (N - 1) * 2 * pi * freq * complex_signal
24:     N_m = 56 * 2 * pi * freq * c * 1000 / (2 * pi * freq * c * 1000)
25:     fft_result_m = fft(complex_signal, n=N_m)
26:     fft_result_shifted_m = fftshift(fft_result_m)
27:     fft_result_shifted_magnitude_m = np.abs(fft_result_shifted_m)
28:     fft_result_shifted_magnitude_m = fft_result_shifted_magnitude_m / np.max(fft_result_shifted_magnitude_m)
29:     spectrum = fft_result_shifted_magnitude_m / (N_m * 2 * pi * freq * c * 1000)
30:     frequencies_m = (fftshift(np.arange(N_m, 0, -1) * c * 1000) / N_m) * 2 * pi * freq
31:     n_m = frequencies_m * c / freq
32:     return n_m, spectrum
33:
34: def calculate_directivity(n_m, spectrum):
35:     mask_full_range = (n_m >= -max(abs(n_m))) & (n_m <= max(abs(n_m)))
36:     mask_partial_range = (n_m >= -1) & (n_m <= 1)
37:     integral_full_range = simpson(spectrum[mask_full_range], x=n_m[mask_full_range])
38:     integral_partial_range = simpson(spectrum[mask_partial_range], x=n_m[mask_partial_range])
39:     directivity = (integral_full_range / integral_partial_range) * 100
40:     return directivity

```

<기존의 N\_parallel 및 Directivity 출력 과정 흐름도>

### VBA 코드 제작

E-field의 정보를 가져오는 코드는 다음과 같이 표현할 수 있다. 해당 코드에 나온 주소는 CST 내부 Navigation Tree의 Tables에 속한 1D Results에서 필요한 E-field 자료의 이름을 작성하면 된다.

```

' E-Field data extraction
Set dataY = ResultTree.GetResultFromTreeItem("Tables\1D Results\curve1_e-field (f=0.476) (1)", "3D:RunID:0")

```

E-field 정보를 저장할 txt의 위치와 이름을 설정한다. 경로는 본인 PC에 맞게 설정해 주면 되며, 해당 주소의 파일이 존재하지 않아도 시뮬레이션을 돌리면 자동 생성된다.

시뮬레이션을 돌릴 때마다 자동으로 덮어쓰기가 되므로 파일을 다른 주소에 새로 저장할 필요가 없어진다.

```
' File storage path
Dim filePath As String
filePath = "W\\tsclient\\D\\N_parallel\\output.txt"
Dim fileNum As Integer
fileNum = FreeFile()
```

해당 주소의 txt 파일에 E-field 정보(Length, Re, Im)를 저장하는 코드이다.

```
' Save To data file (save only numeric values separated by tabs)
For index = 0 To totalPoints - 1
    Re_Vm(index) = dataY.GetYRe(index)
    Im_Vm(index) = dataY.GetYIm(index)
    Length_mm(index) = dataY.GetX(index)

    ' Save data format as "length, real part, imaginary part"
    Print #fileNum, Length_mm(index) & vbTab & Re_Vm(index) & vbTab & Im_Vm(index)
Next index
```

파일을 수동으로 선택하는 방식이던 기존 파이썬 코드를 수정하여 위의 VBA 코드에서 설정한 txt 주소에서 정보를 불러오도록 고정한다.

코드를 아래와 같이 수정함으로써 사람의 개입을 줄이고 자동화 작업을 만들 수 있다.

```
def load_data(file_path):
    """Load data from a file."""
    return pd.read_csv(file_path, comment='#', delimiter='\\t', header=None, names=['Length_mm', 'Re_V/m', 'Im_V/m'])
```

수정 ⇓

```
def load_data():
    """Load data from a specific file without prompting the user."""
    file_path = "W\\tsclient\\D\\N_parallel\\output.txt" # Direct file path
    return pd.read_csv(file_path, comment='#', delimiter='\\t', header=None, names=['Length_mm', 'Re_V/m', 'Im_V/m'])
```

```
def main():
    """Main function to process signal data and plot results."""
    file_path = select_file() # Use the GUI to get the file path
    if file_path: # Proceed only if a file was selected
        data = load_data(file_path)
```

수정 ⇓

```
def main():
    """Main function to process signal data and plot results."""
    data = load_data() # 바로 특정 파일을 로드
```

N\_parallel 및 Directivity를 출력하기 위한 파이썬 코드 주소를 설정한다.

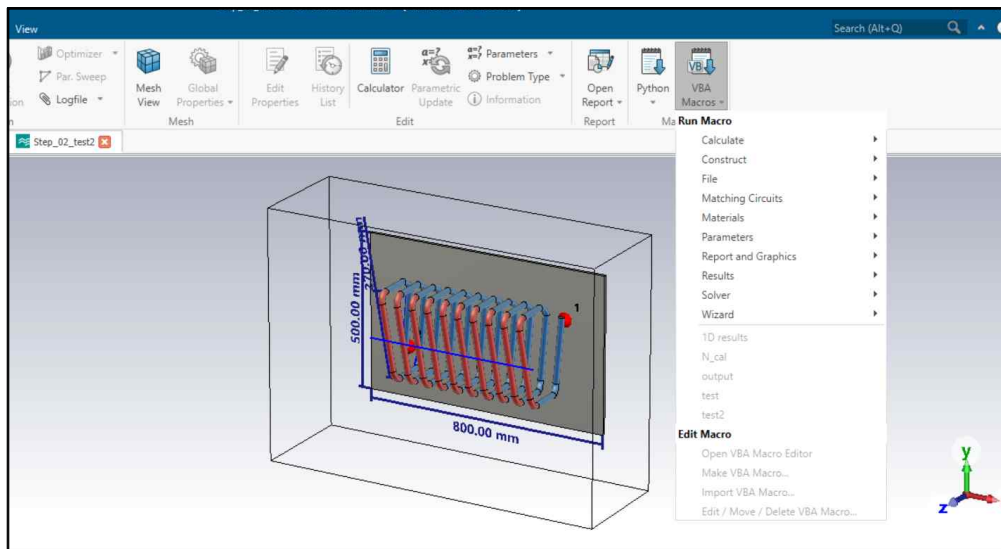
```
' Python Address settings
Dim scriptPath As String
scriptPath = "W\\tsclient\\D\\N_parallel\\Sinlge_data_20241105.py"
```

Visual Studio Code에서 시뮬레이션 돌린 결과를 불러오는 코드이다.

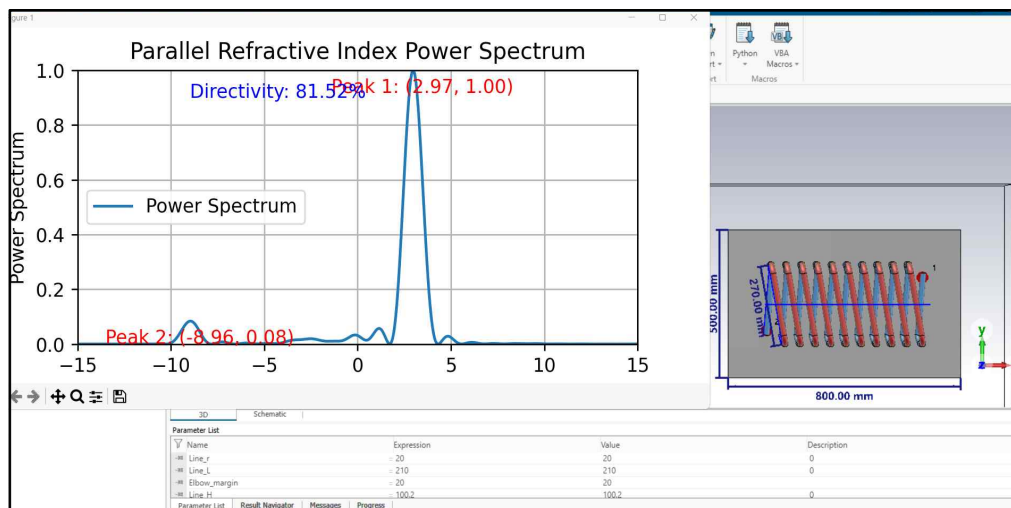
```
' Python execution
Dim result As Double
result = Shell("python "" & scriptPath & """, vbNormalFocus)
```



상기 언급된 VBA 코드를 사용하여, 패러데이 쉴드가 포함되지 않은 안테나의 경우 1분 이내, 쉴드가 포함된 경우 2-3분 내에 Peak  $N_{parallel}$ 과 Directivity 값을 구할 수 있다.  
VBA Macro가 작동하는 동안 다른 Macro 선택지들의 비활성화를 확인함으로써 선택한 Macro가 동작하고 있음을 알 수 있다.



<VBA Macro 실행 화면>



<VBA Macro 실행 결과>

이렇게 만들어진 VBA 코드는 안테나 설계 시 중요한 평가 지표인  $N_{parallel}$  및 Directivity 출력 자동화 작업에 활용이 된다.

## 나) 연구 결과 자체 평가

세부 연구 결과를 보면 Comblin Antenna는 0.475GHz에서  $S_{11} < -15dB$ ,  $S_{21} > -0.5dB$ 의 조건을 만족하고, Helical Antenna는 0.475GHz에서  $S_{11} < -20dB$ ,  $S_{21} > -4dB$ 의 조건을 만족하며 초기 정성적 목표를 달성한 것을 확인할 수 있다. 또한, 안테나 성능을 결정하는 중요 지표인  $n_{parallel}$  값과 directivity가 기존 안테나보다 좋아진 것을 확인할 수 있다.

## 라. 고찰

이번 연구를 통해 헬리컬 안테나와 컴블라인 안테나의 설계 원리와 특성을 분석하고, 각 안테나가 가지는 특성을 이해할 수 있었다.

이번 캡스톤 설계를 통해 핵융합 발전용 헬리컬 안테나를 설계하고 성능을 검증하는 과정을 진행하며, 전반적으로 만족스러운 결과를 얻을 수 있었다. KFE reference와 비교했을 때, S-parameter는 유사한 수준을 유지하면서도  $n_{ll}$  값과 directivity 측면에서 더 우수한 성능을 확인할 수 있었다.

설계 과정에서 Faraday shield 적용이 S-parameter와 E-field에 미치는 영향을 고려하며 반복적인 시뮬레이션과 최적화를 진행하였고, directivity를 높이기 위한 구조적 접근 방식을 탐구하며 새로운 설계 방향을 모색할 수 있었다. 이러한 과정을 통해 이론적 이해를 실제 설계와 시뮬레이션에 적용하는 경험을 쌓을 수 있었다.

비록 시간과 자원의 제한으로 추가적인 최적화 작업을 진행하지 못한 아쉬움이 있으나, 핵융합 발전을 위한 플라즈마 가열 안테나 설계에 있어 중요한 성과를 도출하며 향후 연구와 개발의 기반을 마련하였다는 점에서 의미 있는 프로젝트였다고 판단된다.

## 마. 예산 및 결산

없음.

## 바. 참고문헌

1. H. H. Wi, S. J. Wang, J. Kim, and J. G. Kwak, "RF design of helical long-wire traveling wave antenna for helicon current drive in KSTAR," Fusion Engineering and Design, vol. 195, no. 113983, 2023.
2. H. H. Wi, S. J. Wang, H. J. Kim, and J. G. Kwak, "Design and RF test of a prototype traveling wave antenna for helicon current drive in KSTAR," Fusion Engineering and Design, vol. 126, pp. 67-72, 2018.
3. K. H. Jang, S. J. Wang, H. H. Wi, K. Saito, J. H. Kim, H. Y. Lee, and J. G. Kwak, "Design of multipactor-suppressed high-power VFT for helicon current drive in KSTAR," Fusion Engineering and Design, vol. 161, no. 111960, 2020.
4. S. J. Wang, H. H. Wi, H. J. Kim, J. Kim, J. H. Jeong, and J. G. Kwak, "Helicon wave coupling in KSTAR plasmas for off-axis current drive in high electron pressure plasmas," Nuclear Fusion, vol. 57, no. 4, p. 046010, Feb. 2017, doi: 10.1088/1741-4326/aa5b42.

## 동료 공헌도 평가표

[A]. 목적: 다음 형식은 팀 구성원들이 서로의 공헌도를 평가하는데 사용된다. 프로젝트 기간 중 수집된 결과들은 문제점을 인식하고 팀을 향상시키는데 사용된다. 학기의 마지막 평가는 개인별 점수를 결정하는데 사용될 수 있다. 여러분의 점수는 익명으로 보내지며 팀의 어느 누구에게도 알려지지 않을 것이다.

[B]. 방법:

1. 다음의 빈칸을 채우고 서명하고 봉투에 넣어 담당교수에게 제출하십시오.
2. 각 구성원들의 팀 공헌도를 다음과 같은 점수 (0 - 5)로 평가하십시오.

평점 : 5점(매우 우수), 4(우수), 3(보통), 2(미흡), 1(부족), 0(불량)

- A. 질: 공헌도, 제안, 의견, 아이디어, 창의력 등의 질과 가치
- B. 양: 참여도, 책임감, 팀 회의의 출석률, 팀에게 할당한 임무완수의 의지, 회의 준비
- C. 태도: 태도가 좋지 않았다면, 아래 준비된 여백에 그 문제에 대하여 기술하십시오.  
(대립적, 부정적, 무관심, 게으름, 교만함, 비협조적 등)
- D. 공헌도(백분율로): 각 멤버의 전반적 팀 임무에 대한 공헌도, (모든 멤버의 공헌도의 합은 100%가 되어야 함)
- E. 견해(예,아니오): 여러분은 여러분의 팀 구성원 (일부, 또는 전부)를 다음 프로젝트의 팀 구성에 다시 참여시키고 싶습니까?  
(만약 아니요로 대답했다면, 본인의 팀에 포함시키기 위해 그 구성원의 어떤 점이 개선되기를 바라는지, 또 그 구성원이 어떻게 향상될 수 있는지 뒷면에 한 두 개의 아이디어를 적으시오.)

작성자 이 름 \_\_\_\_\_ 정은지 \_\_\_\_\_ 팀 이름/번호 \_\_\_\_\_ 2팀 \_\_\_\_\_

팀원이름	A(질)	B(양)	C(태도)	D(공헌도)	E(견해)	비고
	평점	평점	평점	백분율(%)	예/아니오	
1. 정은지	5	5	5	33.3 %	예	
2. 유동욱	5	5	5	33.3 %	예	
3. 김태민	5	5	5	33.3 %	예	
4.						
5.						
6.						
계				100 %		



3. 팀의 문제점 및 팀 멤버 중 뛰어난 공헌을 한 멤버의 활동에 대해 커멘트 하시오.

㉠. 문제점

문제 없었습니다. 매주 회의를 진행했고 다들 성실하게 출석하며 적극적으로 참여했습니다.

㉡. 칭찬할 점

매주 회의를 진행했는데, 다들 성실하게 출석하며 적극적으로 참여했습니다.

4. 동료 공헌도 평가는 개인별 점수를 결정하는데 사용됩니다. 캡스톤설계2을 지도해주시는 담당 교수님께서서는 팀원이 개인별로 제출한 팀 공헌도 평가표를 수합하여 분석을 하신 후 본 팀 공헌도 평가표를 작성한 학생을 평가하여 개인별 최종 성적에 반영해 주십시오. 평가점수는 100만점 기준으로 평가해 주십시오.

작성자	정은지	평가점수	/100
평가자		확인	서 명

## 동료 공헌도 평가표

[A]. 목적: 다음 형식은 팀 구성원들이 서로의 공헌도를 평가하는데 사용된다. 프로젝트 기간 중 수집된 결과들은 문제점을 인식하고 팀을 향상시키는데 사용된다. 학기의 마지막 평가는 개인별 점수를 결정하는데 사용될 수 있다. 여러분의 점수는 익명으로 보내지며 팀의 어느 누구에게도 알려지지 않을 것이다.

[B]. 방법:

1. 다음의 빈칸을 채우고 서명하고 봉투에 넣어 담당교수에게 제출하십시오.
2. 각 구성원들의 팀 공헌도를 다음과 같은 점수 (0 - 5)로 평가하십시오.

평점 : 5점(매우 우수), 4(우수), 3(보통), 2(미흡), 1(부족), 0(불량)

- A. 질: 공헌도, 제안, 의견, 아이디어, 창의력 등의 질과 가치
- B. 양: 참여도, 책임감, 팀 회의의 출석률, 팀에게 할당한 임무완수의 의지, 회의 준비
- C. 태도: 태도가 좋지 않았다면, 아래 준비된 여백에 그 문제에 대하여 기술하십시오.  
(대립적, 부정적, 무관심, 게으름, 교만함, 비협조적 등)
- D. 공헌도(백분율로): 각 멤버의 전반적 팀 임무에 대한 공헌도, (모든 멤버의 공헌도의 합은 100%가 되어야 함)
- E. 견해(예,아니오): 여러분은 여러분의 팀 구성원 (일부, 또는 전부)를 다음 프로젝트의 팀 구성에 다시 참여시키고 싶습니까?  
(만약 아니요로 대답했다면, 본인의 팀에 포함시키기 위해 그 구성원의 어떤 점이 개선되기를 바라는지, 또 그 구성원이 어떻게 향상될 수 있는지 뒷면에 한 두 개의 아이디어를 적으시오.)

작성자 이 름 \_\_\_\_\_ 유동욱 \_\_\_\_\_ 팀 이름/번호 \_\_\_\_\_ 2팀 \_\_\_\_\_

팀원이름	A(질)	B(양)	C(태도)	D(공헌도)	E(견해)	비고
	평점	평점	평점	백분율(%)	예/아니오	
1. 유동욱	5	5	5	33.3 %	예	
2. 정은지	5	5	5	33.3 %	예	
3. 김태민	5	5	5	33.3 %	예	
4.						
5.						
6.						
계				100 %		

3. 팀의 문제점 및 팀 멤버 중 뛰어난 공헌을 한 멤버의 활동에 대해 커멘트 하시오.

㉞. 문제점

문제점은 따로 없었습니다. 모두가 함께 역할 분담을 잘 하여 원활하게 진행을 할 수 있었고, 교수님을 찾아뵈어 피드백을 받을 때에도 모두가 참여하여 캡스톤 설계에 높은 관심을 보였습니다.

㉟. 칭찬할 점

매주 월요일마다 교수님을 찾아뵈어 피드백을 받고 이에 대해 맞게 캡스톤 설계를 진행해 나가면서 많은 것들을 얻을 수 있었습니다.

4. 동료 공헌도 평가는 개인별 점수를 결정하는데 사용됩니다. 캡스톤설계2을 지도해주시는 담당 교수님께서서는 팀원이 개인별로 제출한 팀 공헌도 평가표를 수합하여 분석을 하신 후 본 팀 공헌도 평가표를 작성한 학생을 평가하여 개인별 최종 성적에 반영해 주십시오. 평가점수는 100만점 기준으로 평가해 주십시오.

작성자	유동욱	평가점수	/100
평가자		확인	서 명

## 동료 공헌도 평가표

[A]. 목적: 다음 형식은 팀 구성원들이 서로의 공헌도를 평가하는데 사용된다. 프로젝트 기간 중 수집된 결과들은 문제점을 인식하고 팀을 향상시키는데 사용된다. 학기의 마지막 평가는 개인별 점수를 결정하는데 사용될 수 있다. 여러분의 점수는 익명으로 보내지며 팀의 어느 누구에게도 알려지지 않을 것이다.

[B]. 방법:

1. 다음의 빈칸을 채우고 서명하고 봉투에 넣어 담당교수에게 제출하십시오.
2. 각 구성원들의 팀 공헌도를 다음과 같은 점수 (0 - 5)로 평가하십시오.

평점 : 5점(매우 우수), 4(우수), 3(보통), 2(미흡), 1(부족), 0(불량)

- A. 질: 공헌도, 제안, 의견, 아이디어, 창의력 등의 질과 가치
- B. 양: 참여도, 책임감, 팀 회의의 출석률, 팀에게 할당한 임무완수의 의지, 회의 준비
- C. 태도: 태도가 좋지 않았다면, 아래 준비된 여백에 그 문제에 대하여 기술하십시오.  
(대립적, 부정적, 무관심, 게으름, 교만함, 비협조적 등)
- D. 공헌도(백분율로): 각 멤버의 전반적 팀 임무에 대한 공헌도, (모든 멤버의 공헌도의 합은 100%가 되어야 함)
- E. 견해(예,아니오): 여러분은 여러분의 팀 구성원 (일부, 또는 전부)를 다음 프로젝트의 팀 구성에 다시 참여시키고 싶습니까?  
(만약 아니요로 대답했다면, 본인의 팀에 포함시키기 위해 그 구성원의 어떤 점이 개선되기를 바라는지, 또 그 구성원이 어떻게 향상될 수 있는지 뒷면에 한 두 개의 아이디어를 적으시오.)

작성자 이 름 김태민 팀 이름/번호 2조

팀원이름	A(질)	B(양)	C(태도)	D(공헌도)	E(견해)	비고
	평점	평점	평점	백분율(%)	예/아니오	
1. 김태민	5	5	5	33.3%	예	
2. 유동욱	5	5	5	33.3%	예	
3. 정은지	5	5	5	33.3%	예	
계	15	15	15	100 %		

3. 팀의 문제점 및 팀 멤버 중 뛰어난 공헌을 한 멤버의 활동에 대해 커멘트 하시오.

㉞. 문제점

팀의 모든 조원은 각자 맡은 역할을 책임감 있게 수행하며 팀의 목표 달성에 최선을 다해 주었습니다. 각자의 기여가 조화를 이루며 원활하게 진행되었기 때문에 팀이나 팀원 간의 문제점은 발견되지 않았습니다. 오히려 서로의 강점을 발휘하고 협력하며 긍정적인 시너지 효과를 낸 점이 팀 프로젝트의 성공적인 결과를 이끌어낸 중요한 요인이었던 것 같습니다.

㉟. 칭찬할 점

팀의 모든 조원은 서로를 존중하며 적극적으로 소통하고 협력하는 모습을 보여주었습니다. 각자 맡은 역할에 책임감을 가지고 최선을 다했을 뿐만 아니라, 서로의 의견을 경청하고 보완하며 프로젝트를 성공적으로 이끌었습니다. 특히, 각자의 강점을 발휘해 팀의 목표를 효율적으로 달성하는 데 큰 기여를 했다는 점이 매우 인상적이었습니다.

4. 동료 공헌도 평가는 개인별 점수를 결정하는데 사용됩니다. 캡스톤설계2을 지도해주시는 담당 교수님께서서는 팀원이 개인별로 제출한 팀 공헌도 평가표를 수합하여 분석을 하신 후 본 팀 공헌도 평가표를 작성한 학생을 평가하여 개인별 최종 성적에 반영해 주십시오. 평가점수는 100만점 기준으로 평가해 주십시오.

작성자	김태민	평가점수	/100
평가자		확인	서 명