

17-12-N0101-47

암치료기용 LINAC 및 마그네트론 개발

Development of LINAC and Magnetron
for Cancer Treatment Apparatus

한국전기연구원

국 가 과 학 기 술 연 구 회

제 출 문

국가과학기술연구회 이사장 귀하

본 보고서를 “암치료기용 LINAC 및 마그네트론 개발” 과제의 단계보고서로 제출합니다.

2018. 1. 31.

주관연구기관명 : 한국전기연구원
참여기업명 :
위탁기관명 : 가톨릭대학교

주관연구책임자 : 김정일

연 구 원 : 김근주

” : 이용석

” : 김상훈

” : 이정훈

” : 김인수

” : 최영욱

보고서 초록

과제관리번호	17-12-N0101-47	해당단계 연구기간	2015. 1. 1 - 2017. 12. 31		단계 구분	(2) / (2)	
연구사업명	암치료기용 LINAC 및 마그네트론 개발						
연구과제명	대 과 제 명	(위탁연구사업의 경우 작성치 않음)					
	세부과제명	(위탁연구명) 암치료기용 LINAC 평가기술 개발					
연구책임자	김정일	해당단계 참여연구원수	총 : 11명 내부 : 7명 외부 : 4명	해당단계 연구비	정부: 3,070,584천원 기업: 천원 계: 천원		
연구기관명 및 소속부서명	한국전기연구원 첨단의료기기연구본부		참여기업명				
국제공동연구	상대국명 :		상대국연구기관명 :				
위탁연구	연구기관명 : 가톨릭대학교		연구책임자 : 김연실				
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자이내)					보고서 면수	78	
<div>1. 6 MeV X-Band LINAC 개발<ul style="list-style-type: none">- X-Band LINAC 원격제어 통합구동시스템 개발- LINAC System 구동 조건에 따른 가속 전자빔 및 X-ray 특성 평가</div> <div>2. Coupling 특성 향상된 X-Band LINAC 가속관 개발<ul style="list-style-type: none">- Coupling 특성 향상된 X-Band LINAC 설계- X-Band LINAC 가속관 제작 및 RF 특성 평가</div> <div>3. 1.5 MW급 X-Band 마그네트론 설계 및 구성품 개발<ul style="list-style-type: none">- 1.5 MW급 X-Band 마그네트론 설계- 1.5 MW급 X-Band 마그네트론 구성품 개발</div> <div>4. 2.6 MW급 S-Band 마그네트론 설계 및 구성품 개발<ul style="list-style-type: none">- 2.6 MW급 S-Band 마그네트론 설계- 2.6 MW급 S-Band 마그네트론 구성품 개발</div>							
색인어 (각 5개 이상)	한글	암치료기, X-선, 영상유도치료, 선형가속기, 마그네트론					
	영어	Cancer Treatment Apparatus, X-ray, Image Guided Therapy, Linear Accelerator (LINAC), Magnetron					

요 약 문

I. 제 목

암치료기용 LINAC 및 마그네트론 개발

II. 연구개발의 목적 및 필요성

- 암치료를 위한 최신 LINAC (Linear Accelerator, 선형가속기) 기반 방사선치료기는 IMRT (Intensity-modulated radiation therapy, 세기조절방사선치료)와 IGRT (Image-guided radiation therapy, 영상유도방사선치료) 기술을 이용하여 종양의 위치와 모양을 확인하고 고정밀·고선량의 방사선을 효과적으로 조사하여 정상조직의 기능적 손상 없이 치료효과를 극대화함.
- 진단에 활용하던 CT 및 MRI 영상기기를 LINAC 기반 방사선치료기에 융합하여 인체를 모니터링하면서 치료하는 CT-LINAC, MR-LINAC 등의 영상유도 방사선치료기 기술이 연구되고 있음.
- 진단 영상기와 LINAC 기반 방사선치료기를 간섭 없이 효율적으로 융합하기 위해서는 소형 경량의 LINAC 및 마그네트론의 기술 개발이 필요함.
- MR 영상기반 LINAC 암치료를 위해서는 MRI와 LINAC의 융합이 필수적인데, MRI와 융합하기 위해서는 LINAC이 MRI 자기장에 교란을 주지 않아야 하고, MRI의 자기장이 LINAC 전자빔에 영향을 주지 않는 구조를 위해서 소형 경량의 LINAC이 필요함.
- LINAC 구동을 위해서는 전자기파 에너지를 공급하는 고출력 마그네트론이 반드시 필요한데, 소형 경량의 LINAC을 위해서는 X-Band (9.3 GHz)에서 고출력 전자기파 에너지를 발생시키는 마그네트론이 필요함.
- 기존 방사선 암치료기에는 대부분 S-Band (3.0 GHz) LINAC이 적용되고 있고, 최근 S-Band 대역에서도 전자기파 에너지를 공급하기 위해 클라이스트론 대신에 마그네트론이 적용되는 기술현황을 보았을 때, 의료분야와 산업분야 응용을 위해 S-Band 고출력 마그네트론 개발도 필요함.

Ⅲ. 연구개발의 내용 및 범위

- 6 MeV X-Band LINAC 개발
- Coupling 특성 향상된 X-Band LINAC 가속관 개발
- 1.5 MW급 X-Band 마그네트론 설계 및 구성품 개발
- 2.6 MW급 S-Band 마그네트론 설계 및 구성품 개발

Ⅳ. 연구개발결과

1. 6 MeV X-Band LINAC 개발
 - X-Band LINAC 원격제어 통합구동시스템 개발
 - LINAC System 구동 조건에 따른 가속 전자빔 및 X-ray 특성 평가
2. Coupling 특성 향상된 X-Band LINAC 가속관 개발
 - Coupling 특성 향상된 X-Band LINAC 설계
 - X-Band LINAC 가속관 제작 및 RF 특성 평가
3. 1.5 MW급 X-Band 마그네트론 설계 및 구성품 개발
 - 1.5 MW급 X-Band 마그네트론 설계
 - 1.5 MW급 X-Band 마그네트론 구성품 개발
4. 2.6 MW급 S-Band 마그네트론 설계 및 구성품 개발
 - 2.6 MW급 S-Band 마그네트론 설계
 - 2.6 MW급 S-Band 마그네트론 구성품 개발

Ⅴ. 연구개발결과의 활용계획

- LINAC 기반 응용시스템인 CyberKnife, CT-LINAC, MR-LINAC 등의 의료용 방사선 치료기, 컨테이너 검사장치 및 산업부품 검사장치 등의 X-ray 비파괴 검사장치, 공업, 환경 분야에서의 방사선 기반 산업용 가공장치 등과 관련된 업체에 상용화되도록 기술이전 추진.
- 마그네트론 기술은 마이크로파 대역부터 테라헤르츠 (THz) 대역까지의 고출력 전자파를 발생시킬 수 있는 기술로서, 기술 자립을 통해 국내 기반기술을 확보하여 국내 산업의 신시장 창출.

SUMMARY

I . Title

Development of LINAC and Magnetron for Cancer Treatment Apparatus

II. Objectives and Necessity

- The latest LINAC-based radiotherapy for cancer treatment uses IMRT and IGRT technology to identify the location and shape of the tumor and effectively irradiate high-dose x-ray beam to maximize the therapeutic effect without impairing normal tissue function.
- CT-LINAC, MR-LINAC, and other image-guided radiotherapy technologies are being studied to monitor the human body by fusing the CT and MRI imaging devices used for diagnosis to LINAC-based radiotherapy devices.
- In order to efficiently integrate diagnostic imaging devices and LINAC-based radiotherapy devices without interference, it is necessary to develop a small-sized lightweight LINAC and magnetron technology.
- For LINAC radiotherapy system based on MR imaging, fusion of MRI and LINAC is essential. In order to fuse with MRI, LINAC should not disturb the MRI magnetic field and, the magnetic field of MRI do not affect the electron beam inside the LINAC. And, the small-sized lightweight LINAC technology is needed.
- To operate LINAC, a high-power magnetron that supplies electromagnetic energy is required. For LINAC of small size and light, the magnetron that generates high output electromagnetic wave at X-Band (9.3 GHz) is required.
- S-Band (3.0 GHz) LINAC has been applied to existing radiation cancer therapy devices. Recently, when magnetron was applied instead of klystron to supply electromagnetic wave in S-Band System, S-Band High Power Magnetron is also required to develop for the radiotherapy system.

III. Contents and Scope of the Study

- Development of 6 MeV X-Band LINAC
- Development of X-Band LINAC Accelerator Tube with Improved Coupling Characteristics
- Design the X-Band Magnetron and Development of Magnetron Components
- Design the S-Band Magnetron and Development of Magnetron Components

IV. Results of Study

1. Development of 6 MeV X-Band LINAC
 - Development of Remote Control System for X-Band LINAC
 - Evaluation of Accelerated Electron Beam and X-ray According to the Operation Condition of LINAC System
2. Development of X-Band LINAC Accelerating Tube with Improved Coupling Characteristics
 - Design of X-Band LINAC with Improved Coupling Characteristics
 - Fabrication of Accelerating Tube and Measurement of RF Property
3. Design the X-Band Magnetron and Development of Magnetron Components
 - Design of 1.5 MW X-Band Magnetron
 - Development of Components for 1.5 MW X-Band Magnetron
4. Design the S-Band Magnetron and Development of Magnetron Components
 - Design of 2.6 MW S-Band Magnetron
 - Development of Components for 2.6 MW S-Band Magnetron

V. Expected Application of the Study

- Developed LINAC technology will be commercialized for LINAC based systems such as the LINAC based cancer therapy apparatus, the X-ray inspection systems, and the industrial processing systems.
- Technology of magnetron can generate high output electromagnetic wave from microwave to THz frequency range. It can secure domestic technology through technology independence and create new market for domestic industry.

CONTENTS

Chapter 1. Introduction	11
Section 1. Introduction	11
Section 2. Necessity on Development of Technology	12
Chapter 2. Status of Technology	14
Section 1. R&D Status in Abroad	14
Section 2. R&D Status in Korea	15
Section 3. Patent Status	15
Chapter 3. R&D Activities and Their Achievements	17
Section 1. Development of 6 MeV X-Band LINAC	17
1. Development of Remote Control System for X-Band LINAC	17
2. Evaluation of Accelerated Electron Beam	21
3. Evaluation of X-ray Beam	28
Section 2. Development of X-Band LINAC Accelerating Tube with Improved Coupling Characteristics	39
1. Design of X-Band LINAC with Improved Coupling Characteristics	39
2. Fabrication of X-Band LINAC Accelerating Tube	44
3. Analysis of RF Performances	47

Section 3. Development of 1.5 MW X-Band Magnetron	49
1. Development of X-Band Coaxial Resonator	49
2. Evaluation of Output Performances	52
3. Development of X-Band Magnetron Components	55
Section 4. Development of 2.6 MW S-Band Magnetron	60
1. Development of S-Band Strapped Resonator	60
2. Evaluation of Output Performances	63
3. Development of S-Band Magnetron Components	66
Chapter 4. R&D Achievements and Contribution	73
Section 1. R&D Achievements	73
Section 2. Contribution of R&D Results to Other Field	73
Chapter 5. Application Plan of R&D Achievements	75
Chapter 6. References	76

목 차

제 1장 연구개발 과제의 개요	11
제 1절 연구개발 기술의 개요	11
제 2절 현재 기술의 문제점 및 기술 개발의 필요성	12
제 2장 국내외 기술개발 현황	14
제 1절 국외 연구동향	14
제 2절 국내 연구동향	15
제 3절 특허 동향	15
제 3장 연구개발수행 내용 및 결과	17
제 1절 X-Band LINAC 개발	17
1. X-Band LINAC 원격제어 통합구동시스템 개발	17
2. LINAC System 구동 조건에 따른 가속 전자빔 특성 평가	21
3. LINAC System 구동 조건에 따른 X-ray Beam 특성 평가	28
제 2절 Coupling 특성 향상된 X-Band LINAC 가속관 개발	39
1. Coupling 특성 향상된 X-Band LINAC 설계	39
2. X-Band LINAC 가속관 제작	44
3. X-Band LINAC 가속관 RF 특성 분석	47

제 3절 1.5 MW급 X-Band 마그네트론 개발	49
1. X-Band Coaxial Resonator 설계	49
2. X-Band 마그네트론 출력 특성 분석	52
3. X-Band 마그네트론 구성품 개발	55
제 4절 2.6 MW급 S-Band 마그네트론 개발	60
1. S-Band Strapped Resonator 설계	60
2. S-Band 마그네트론 출력 특성 분석	63
3. S-Band 마그네트론 구성품 개발	66
제 4장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도	73
제 1절 목표 달성도	73
제 2절 연구결과의 관련분야에의 기여도	73
제 5장 연구개발 결과의 활용 계획	75
제 6장 참고 문헌	76

제 1장. 연구개발과제의 개요

제 1절. 연구개발 기술의 개요

- 암치료를 위한 최신 LINAC (Linear accelerator, 선형가속기) 기반 방사선 치료기는 IMRT (Intensity-modulated radiation therapy, 세기조절 방사선치료)와 IGRT (Image-guided radiation therapy, 영상유도 방사선치료) 기술을 이용하여, 종양의 위치와 모양을 확인하고 고정밀·고선량의 방사선을 효과적으로 조사하여 정상조직의 기능적 손상 없이 치료효과를 극대화함.
- 진단에 활용하던 CT 및 MRI 영상기기를 LINAC 기반 방사선치료기에 융합하여 인체를 모니터링하면서 치료하는 CT-LINAC, MR-LINAC 등의 영상유도 방사선 치료기 기술이 연구되고 있음.
- 진단 영상기기와 LINAC 기반 방사선치료기를 간섭 없이 효율적으로 융합하기 위해서는 소형 경량의 LINAC 기술 및 LINAC 구동에 필요한 RF 에너지를 공급하는 마그네트론 (Magnetron)의 기술 개발이 필요함.

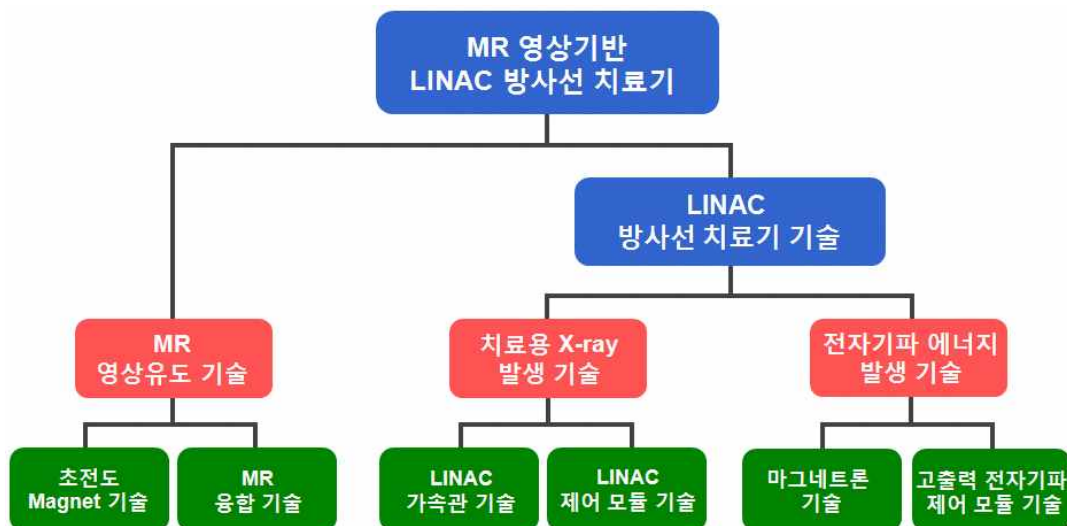


그림 1. MR 영상기반 LINAC 암치료기 기술

- MR 영상기반 LINAC 암치료기를 위해서는 MRI와 LINAC의 융합이 필수적인데, MRI와 융합하기 위해서는 LINAC이 MRI 자기장에 교란을 주지 않아야 하고, MRI의 자기장이 LINAC 전자빔에 영향을 주지 않는 구조를 위해서 소형 경량의 X-Band (9.3 GHz) LINAC 기술의 개발이 필요함.

- LINAC 구동을 위해서는 전자기파 에너지를 공급하는 고출력 마그네트론이 반드시 필요한데, 소형 경량의 X-Band LINAC을 위해서 X-Band (9.3 GHz)에서 고출력 전자기파 에너지를 발생시키는 마그네트론 기술 개발이 필요함.
- 기존 방사선 암치료기에는 대부분 S-Band (3.0 GHz) LINAC이 적용되고 있고, 최근 S-Band 대역에서도 전자기파 에너지를 공급하기 위해 클라이스트론 (Klystron) 대신에 마그네트론이 적용되는 기술현황을 보았을 때, 의료분야와 산업분야 응용을 위해 S-Band 고출력 마그네트론 기술 개발도 필요함.

제 2절. 현재 기술의 문제점 및 기술 개발의 필요성

- X-Band LINAC 개발을 통해 LINAC 동작 주파수가 S-Band LINAC에 비해 3배 증가하면 LINAC 길이는 3배 감소될 뿐만 아니라, LINAC 구동을 위해 필요한 RF System (4-Port Circulator, RF Waveguide, RF Coupler 등)의 크기, 무게도 감소되어, MR-LINAC 융합시스템을 위한 Gantry 구조 설계 시 불필요한 제한 요소를 제거할 수 있음.
- LINAC의 크기, 무게, 공진기 구조 등은 전자기파 에너지를 발생시켜 LINAC에 공급하는 고출력 전자기파 소자인 마그네트론의 주파수 및 출력 특성이 결정하고 있어, 마그네트론 기술 개발이 LINAC 개발과 함께 진행되어야 함.



그림 2. 암치료기용 LINAC System 구조

- 국방 분야 활용으로 인한 마그네트론의 심각한 수입 제한 문제를 해결하면서, LINAC 암치료기의 세계적 기술 경쟁력을 확보하기 위해서는, 1.7 MW급 X-Band (9.3 GHz) 마그네트론의 독자적인 기술 자립이 필요함.
- 기존 방사선 암치료기에서 대부분 사용되고 있고, 산업용 LINAC 기반 응용시스템의 다양한 응용분야에 활용되고 있는 3.0 MW급 S-Band (3.0 GHz) 마그네트론의 기술 개발도 요구되고 있음.
- 마그네트론은 진공 내 전자빔의 에너지로부터 전자기파 에너지를 생성하는 진공전자소자 (Vacuum Electronic Device)로서, 고전류 고전압 조건에서 사용되어 동작 수명이 짧아 주기적인 교체가 필요하며, 이를 개선하기 위해 3차원 다중물리 (전자기장·전자빔·열·구조) 설계 및 해석 기술, 고밀도 고전류 음극 기술, 동작 Mode 안정화 기술 등의 기술 개발이 요구되고 있음.

제 2장. 국내외 기술개발 현황

제 1절. 국외 연구동향

- 방사선 암치료기 세계 시장은 2015년 5.6조에서 2020년 7.5조 규모로 연평균 6.2%로 성장할 것으로 예측되나, 미국 Varian, 스웨덴 Elekta 등의 4개사가 시장의 90%를 점유하고 있으며, 국내 방사선 암치료기는 100% 수입에 의존하고 있어 무역 불균형이 매우 심각한 상황임.
- 진단에 활용하던 CT 및 MRI 영상기기를 LINAC 기반 방사선치료기에 융합하여 인체를 모니터링하면서 치료하는 CT-LINAC, MR-LINAC 등의 영상유도 방사선 치료기 기술이 연구되고 있음.
- 미국 Viewray의 MRIdian LINAC은 Split 구조의 초전도자석으로 구성된 0.35 T MRI와 S-Band 6 MeV LINAC을 융합하여 2017년 2월 미국 FDA에서 승인받아 세계 최초로 시판중인 MR 영상기반 LINAC 치료기 기술임.
- 스웨덴 Elekta의 MRI-LINAC은 Philips의 1.5 T MRI 기술과 Elekta의 S-Band LINAC 기술을 융합한 MR 영상기반 LINAC 치료기로서, 현재 전 세계적으로 7 곳에 설치되어 실험 중에 있으며 2017년에 허가를 받을 계획임.
- 미국 Tomotherapy는 S-Band 6 MeV LINAC 기반 암 치료 시스템에 MV-CT를 융합하였고, 일본 Vero는 C-Band 6 MeV LINAC 기반 방사선 치료 시스템에 KV-CT를 융합한 치료기로 치료 시에 CT 영상을 통해 종양의 정확한 위치를 파악하고 추적하여 환자의 자세변화를 교정함으로써 치료 효과를 극대화한 치료기 기술임.
- 암치료기용 9.3 GHz 마그네트론 기술은 미국 L3 Communications, 3.0 GHz 마그네트론 기술은 영국 e2V사가 기술을 독점하며, 생산 판매하고 있어 기술 종속이 매우 큰 기술 분야임.
- 2002년부터 2년간 영국 E2V 회사에서는 기존에 개발된 9.5 GHz 대역의 마그네트론 성능 향상을 위해 영국 London 대학교 공동으로 마그네트론의 3차원 시뮬레이션 분석을 위한 연구를 수행하였음.
- 2001년부터 3년간 미국 Michigan 대학교에서는 1 kW급 2.45 GHz 가정용 마그네트론의 노이즈 절감을 위한 연구를 수행하였고, 현재는 국방 응용을 위한 MW급 1 GHz 고출력 마그네트론 개발을 위한 연구를 수행하고 있음.

제 2절. 국내 연구동향

- 국가과학기술연구회 융합연구사업을 통해 X-Band LINAC 기반 CT 영상유도 방사선 암치료기 기술 개발 사업이 수행되었고, 산자부 산업핵심기술개발사업을 통해 MR-LINAC 핵심원천기술 개발 사업이 수행되었음.
- 한국전기연구원은 X-Band LINAC 기반 MRI 영상유도 방사선 암치료기 설계기술, 6 MeV급 X-Band LINAC 기술, 의료용 S-Band 및 X-Band 마그네트론 기술을 개발하고 있음.
- 동남권원자력의학원은 방사선 암치료기용 Axial Coupling 방식의 C-Band (5.0 GHz) 6 MeV LINAC 기술을 개발하였고, 성균관대는 X-Band LINAC 기반 Dual Gantry 방사선 암치료기 개발 사업을 수행하고 있음.
- 한국원자력연구원은 컨테이너 검색기용 S-Band (3.0 GHz) 6 MeV/9 MeV LINAC 기술을 개발하였으며, (주)썬크는 비파괴 검사기용 S-Band 6 MeV LINAC 기술을 개발하였음.
- 2008년부터 2년간 한국전기연구원은 지식경제부 국제협력사업으로 우크라이나 IRE 국립연구소와 공동으로 고해상도 레이더용 35 GHz 2.5 kW급 마그네트론을 개발하였음.
- 2002년부터 3년간 서울대학교에서는 삼성전자의 연구과제로 가정용 전자레인지에 사용되는 1 kW급 2.45 GHz 마이크로파 마그네트론의 3차원 시뮬레이션 분석과 노이즈 절감 및 성능 향상을 위한 연구를 수행하였음.
- 국내에서는 의료용 마그네트론 기술에 대한 연구가 수행되지 않았음.

제 3절. 특허 동향

- 영상유도 방사선 암치료기 기술 분야의 주요출원인 상위 Top10을 추출한 결과, 스웨덴의 Elekta가 1위를 차지한 것으로 나타났으며, 그 외 대부분이 일본과 독일의 기업이 강세인 것으로 분석됨. 특히 Elekta, Siemens의 경우 해외 시장 진입을 위해 다양한 국가에 특허 출원 활동을 전개하고 있는 것으로 나타남.

- 방사선 암치료기 기술 관련 스웨덴 및 일본, 독일, 미국의 주요 기업에서 다수의 특허 출원이 나타나고 있으며, 또한 전 세계의 기술력 및 시장을 선점하고 있음. 이는, 각국의 기술 권리획득을 통한 관련 기술의 후발업자의 시장진출을 막고, 또한 커지고 있는 시장에 대한 시장 점유율을 높이기 위한 전략적인 출원의 경우로 판단됨.
- 방사선 암치료기 주요기업 (Varian Medical, Elekta, Mitsubishi, Siemens, Accuray 등)들의 기술 개발 동향을 살펴보면, 전반적으로 방사선 조사 효율을 향상시키기 위한 제어 시스템 기술에 집중하여 연구 개발이 이루어지고 있음을 알 수 있음.
- 마그네트론의 개발은 이차세계대전을 기점으로 군수용 레이더 응용을 위해 미국, 영국 등에서 연구개발 되었고, 특히 미국 MIT등의 대학을 중심으로 국가 중점사업으로 개발되었으며, 그 후 관련 기술이 민간에 응용되어 미국 CPI (Communications and Power Industries)와 L3등의 회사에서 밀리미터파대의 마그네트론을 포함하여 마이크로파 대역의 다양한 주파수와 출력을 내는 마그네트론을 생산하여 판매하고 있음.
- LINAC 치료기에 사용되는 고출력 9.3 GHz (X-Band) 마그네트론은 국방용 레이더에 사용되는 X-Band 주파수 대역으로서 산업적 국가 전략적 이유로 기술 보유국으로부터의 기술 이전이 어려워 기술 종속이 심하고, 마그네트론 개발 시 기반기술인 초정밀 가공기술, Vacuum Brazing 기술, 고출력 전자기파 제어·측정·분석 기술, 재료 기술 등이 요구되는 기술로 기술 보유국과 기술 격차가 큰 분야로 인정받고 있어, 이로 인해 고부가가치 핵심 부품으로 판매되고 있음.
- 마그네트론의 원천특허는 대부분 특허 존속 기간이 종료되었고, 미국 L3사, 영국 e2V사 등에서는 관련 기술을 보호하며 전세계적인 시장을 독점적으로 지배하고 있는 상황임.
- 특허 존속 기간이 종료된 마그네트론과 관련된 특허는 자유기술로 활용하여 초기 연구개발 진입에 필요한 시간을 조기에 단축할 수 있음.

제 3장. 연구개발수행 내용 및 결과

제 1절. X-Band LINAC 개발

1. X-Band LINAC 원격제어 통합구동시스템 개발

가. X-Band LINAC System 구성

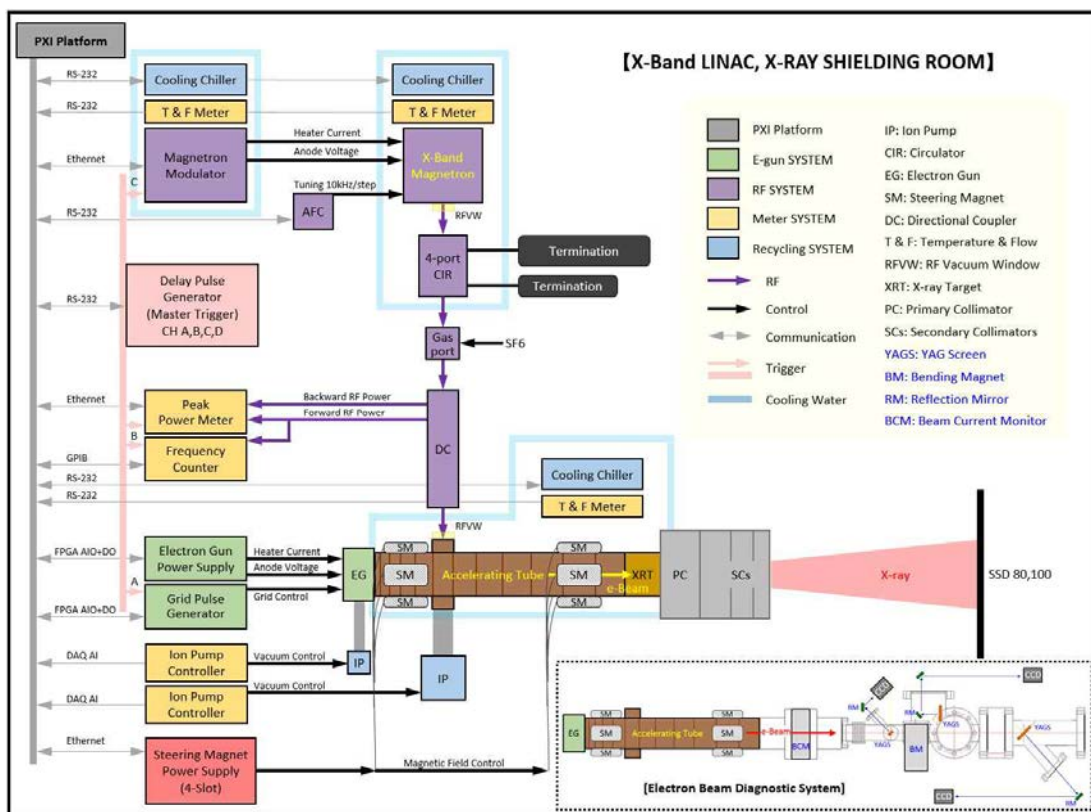


그림 3. X-Band LINAC 원격제어 통합구동시스템 구성도

X-Band LINAC System은 X-Band LINAC, RF System, 전자총 System, 냉각 System, 진공 System, X-ray Target으로 구성되어 있으며, 각 System은 전원장치, 계측기 및 제어기를 포함하고 있음. 위의 장치들 이외에 전자빔 진단 및 X-ray 빔 진단장치를 추가적으로 개발하여 LINAC System에 의한 가속 전자빔 특성과 고에너지 X-ray 빔 측정이 가능하도록 System을 구축하였으며, 각 하위 System들은 원격제어 통합구동 시스템에 의해 제어 및 모니터링 가능하도록 개발함.

나. X-Band LINAC 통합구동시스템 개발

System 구동 시 안정성이 뛰어난 PXI 플랫폼을 이용하여 X-Band LINAC System 원격제어 통합구동을 위한 제어시스템을 개발하였음. PXI는 측정 및 자동화 시스템을 위한 PC 기반 플랫폼으로써, 시스템 컨트롤러 및 테스트 모듈로 하드웨어가 구성되어 있으며, LabVIEW 소프트웨어를 내장하고 있음.

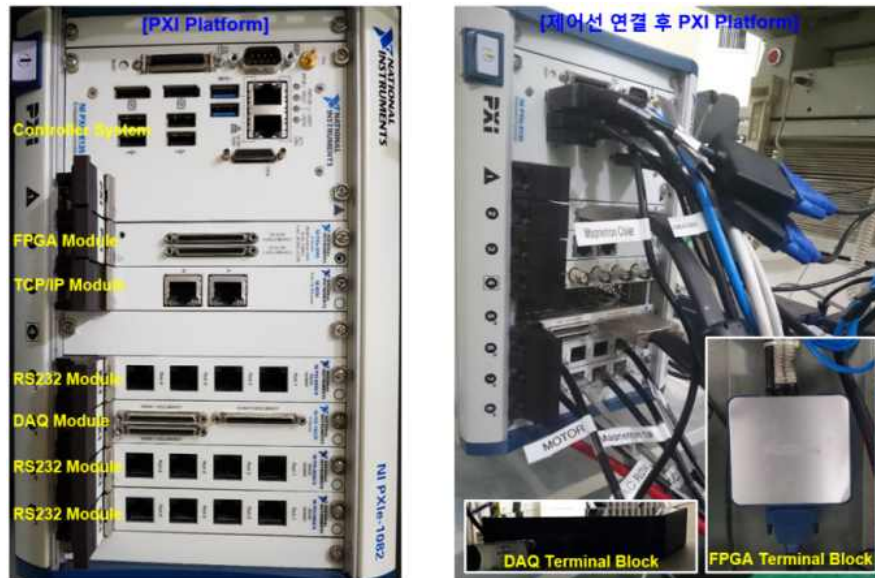


그림 4. X-Band LINAC 원격제어 통합구동시스템 PXI 플랫폼

통합구동시스템을 구성하기 위하여 윈도우 기반의 컨트롤러, FPGA 모듈, DAQ 모듈 및 RS232 모듈을 사용하였으며, 각종 장비와의 원활한 통신을 위해 안정성이 검증된 RS232, GPIB, TCP/IP 및 AIO/DIO 통신 규격을 사용함. 또한, RF 노이즈 및 고전압 서지로 인한 통신오류가 발생 되지 않도록 이중차폐 구조의 통신 케이블을 사용하여 시스템이 안정적으로 구동 되도록 하였고, LabVIEW 프로그램을 사용하여 X-Band LINAC 원격제어를 위한 통합구동시스템을 개발하였음.

다. 원격제어 통합구동 프로그램 개발

LabVIEW 프로그램을 사용하여 개발된 X-Band LINAC 통합구동시스템 프로그램은 LINAC System의 장비를 제어하고 데이터를 모니터링 함으로써 LINAC System의 안정적인 구동을 확보하고 실시간으로 이상 유무를 판단하여 각종 오작동 시 신속한 대응이 가능하도록 함. LINAC 통합구동시스템 프로그램은 실행부, 전자총 제어부, 진공/온도/유량 계측부, RF 제어부 및 제어/모니터링부와 같이 크게 5부분으로 구성되어 있음.

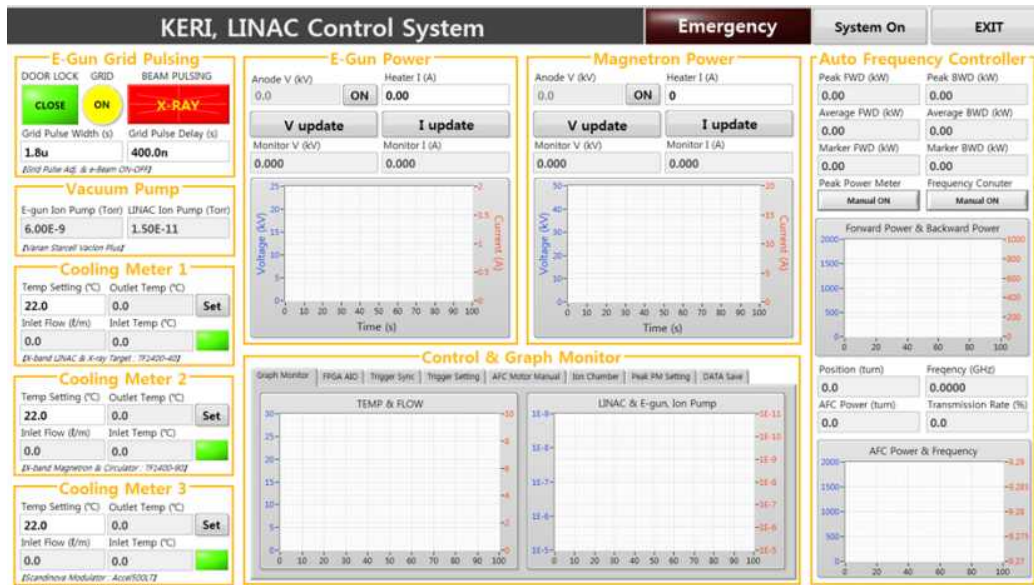


그림 5. X-Band LINAC 통합구동시스템 원격제어 프로그램

[실행부] Emergency, System On, EXIT의 버튼으로 LINAC 통합구동시스템 프로그램의 실행, 정지, 차단 기능을 가진 부분으로 프로그램을 동작시켜 장비와의 통신 상태를 점검하고, LINAC 시스템의 구동 대기상태를 유지 하거나 종료시키는 역할을 수행함.

[전자총 제어부] E-Gun Power, E-Gun Grid Pulsing의 전자총을 제어하는 부분으로 Anode 전압, Heater 전류, Grid 펄스를 제어하여 가속에 필요한 초기 전자빔을 방출시키는 역할을 함.

[진공/온도/유량 계측부] 전자총 및 LINAC 가속관 내부의 진공을 실시간으로 모니터링하는 부분, 마그네트론 및 LINAC 가속관 온도를 실시간으로 모니터링하는 부분, 냉각 시스템의 온도와 유량을 실시간으로 모니터링하는 부분으로 구성되었으며, 각각의 모니터링 값을 GUI 상에 실시간으로 표시함.

[RF 제어부] Magnetron Power 및 AFC (Auto Frequency Control) System를 제어하는 부분으로 마그네트론의 Anode 전압, Heater 전류 및 공진 주파수를 조절하여, RF Power를 LINAC 가속관으로 전송 시키는 역할을 하며, Peak Power Meter, AFC 모터 및 Frequency Counter로부터 수신되는 정보들을 나타냄.

[제어/모니터링부] LINAC 통합구동에 필수적인 장비의 제어 및 데이터를 출력하는 부분으로 아래와 같이 세부적으로 구성되어 있음.

- 데이터를 그래프로 표시하는 탭
- 장비 간 동기화 상태를 표시하는 Trigger Sync 탭
- Trigger 모드, 펄스폭 및 펄스지연을 제어하는 Setting 탭
- 수동으로 AFC 모터를 제어하는 AFC Motor Manual 탭

- X-ray 에너지 및 선량을 측정용 Ion chamber 및 Electrometer를 제어하기 위한 Ion Chamber 탭
- Peak Power Meter를 제어하는 Peak PM Setting 탭
- 프로그램에 표시되는 모든 데이터 값을 저장하는 DATA Save 탭

라. 원격제어 시스템

LINAC System으로부터 X-ray가 발생하게 되므로, 이를 차폐하기 위한 차폐실 내에 장비들이 위치하게 되고, LINAC System 구동은 차폐실 외부의 조정실에서 수행됨. 따라서 통합구동을 위한 PXI 플랫폼을 실시간으로 외부에서 원격제어하기 위한 TCP/IP 네트워크 기반 원격제어 기술을 개발함.



그림 6. X-Band LINAC 원격제어 통합구동 조정실 (Control Room)

Main Hub를 중심으로 PXI 플랫폼을 연결하고, LabVIEW 프로그램의 Web 출판 및 Windows 원격데스크톱 방식을 사용하여 조정실 PC에서 LINAC 통합구동이 실시간으로 가능하도록 하였음. 또한 차폐실 내부에 Main Hub와 연결되는 Hub를 2개로 분산시켜 장비 간 네트워크를 효율적으로 구성함.

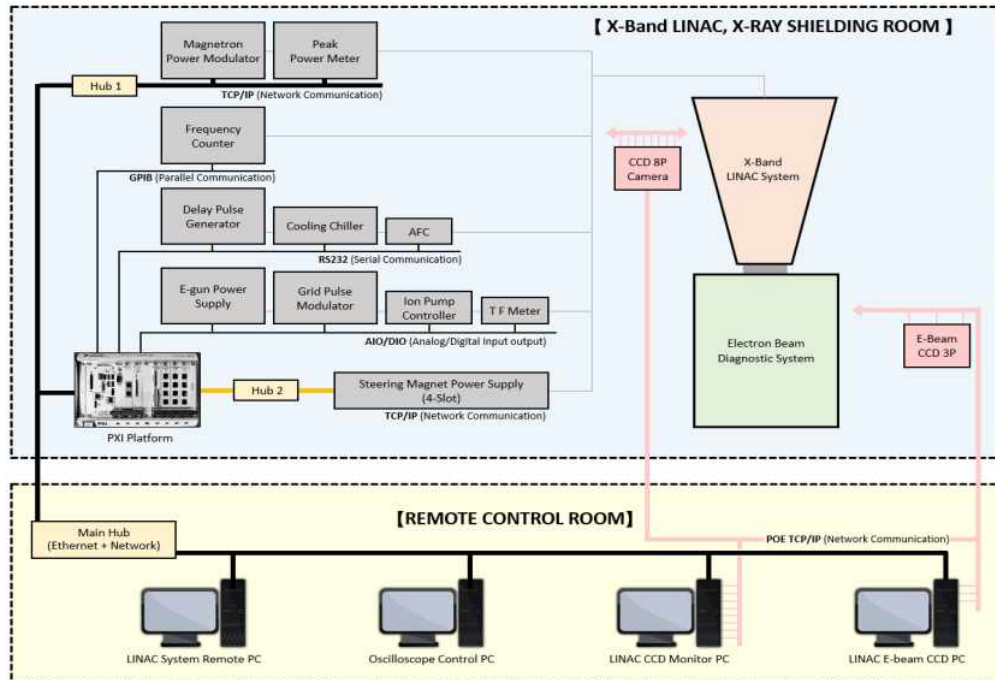


그림 7. X-Band LINAC 원격제어 통합구동시스템 구조

2. LINAC System 구동 조건에 따른 가속 전자빔 특성 평가

가. X-Band RF System 특성 측정

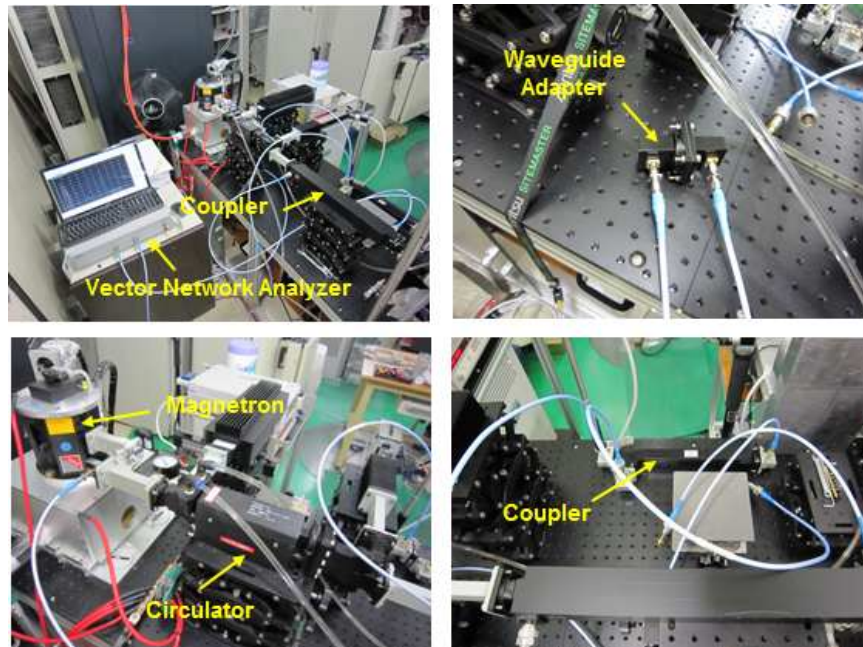


그림 8. X-Band RF System Calibration을 위한 S-parameter 특성 측정

X-Band RF System을 통해 LINAC으로 공급되고 계측장비들에 의해 측정되는 신호들에 대한 정확한 모니터링을 위하여, X-Band RF System 각각에 대한 S-parameter 특성을 측정하고 이를 바탕으로 Forward power와 Reflection power에 대한 Calibration을 수행함.

Transmittance S_{21}		Forward Frequency		Forward Power	
Setup	S_{21} (dB)	Setup	S_{21} (dB)	Setup	S_{21} (dB)
WGA - RF system - WGA	-0.7108	60 dB Coupler	-61.8481	60 dB Coupler	-61.8481
WGA - WGA	-0.229	40 dB Coupler Coupling	-41.0418	40 dB Coupler FWD	-1.3596
Cal Factor (dB)	-0.482	WGA - WGA	-0.229	20 dB ATT + 10 dB ATT	-30.4471
		Cal Factor (dB)	-102.661	WGA - WGA	-0.229
				Cal Factor (dB)	-93.426
Power @ FWD Power		Backward Power		Power @ BWD Power	
Setup	Power	Setup	S_{21} (dB)	Setup	Power
Frequency	9.3 GHz	70 dB Coupler	-72.7141	Frequency	9.3 GHz
Input Power	1.700 MW (92.304 dBm)	20 dB ATT	-20.2622	Input Power	1.700 MW (92.304 dBm)
CAL Factor	-93.43 dB	WGA - WGA	-0.229	CAL Factor	-92.75 dB
Output Power	-1.121 dBm	Cal Factor (dB)	-92.747	Output Power	-0.443 dBm

그림 9. X-Band RF System의 S-parameter 특성

나. X-Band 마그네트론 주파수 Tuning 특성 측정

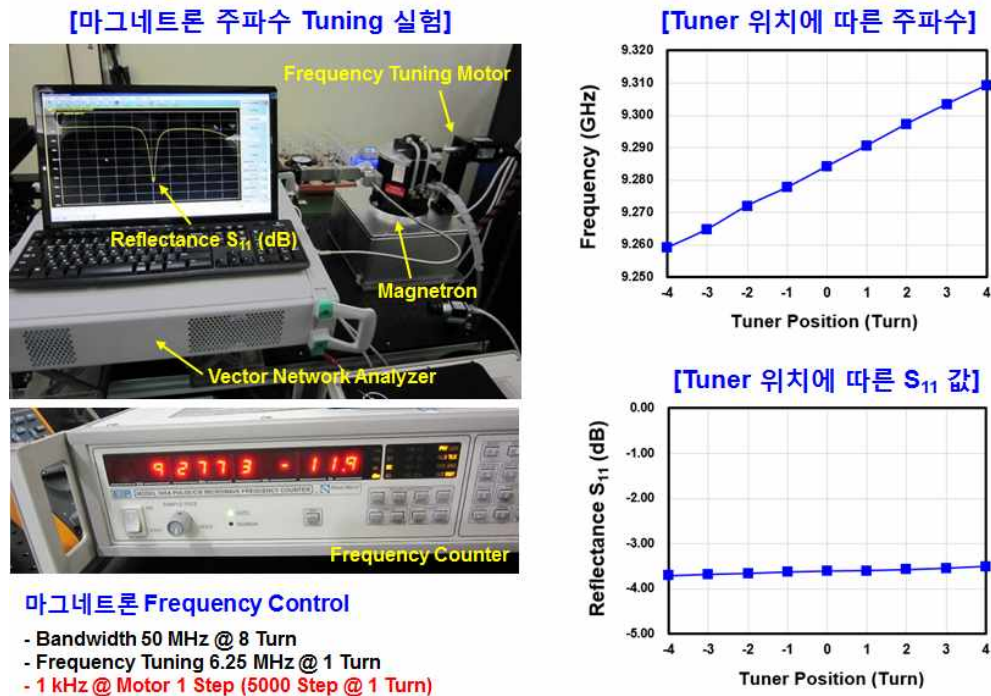


그림 10. X-Band 마그네트론 주파수 Tuning 특성
(Tuner 조정에 따른 공진주파수 변화 특성)

LINAC System에 고출력 RF power를 인가하기 위하여 X-Band Magnetron의 RF 출력 특성을 분석하고, LINAC System의 구동 조건을 설정하기 위하여, X-Band Magnetron의 Tuner 조정에 따른 공진주파수 특성, Bandwidth, 출력 특성 변화 등을 측정함.

다. 가속전자빔 진단 System 개발

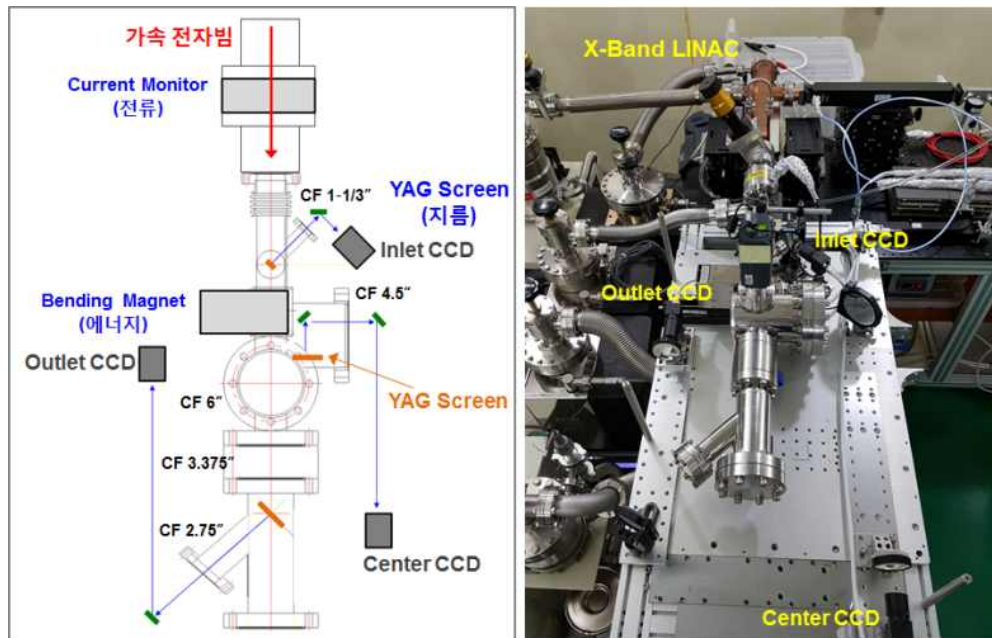


그림 11. 가속 전자빔 특성 평가를 위한 진단 System

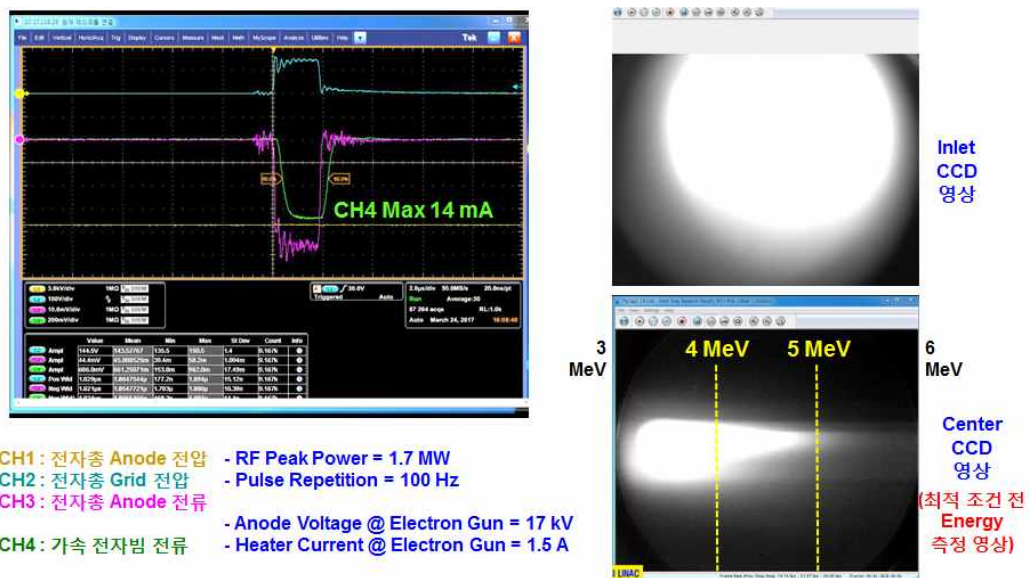


그림 12. 가속 전자빔 특성 측정결과

LINAC System에서 발생하는 전자빔의 특성을 측정하기 위하여 영구자석, Beam Current Monitor, YAG Screen과 CCD 카메라를 기반으로 한 전자빔 진단 System을 개발함. 외부에서 인가된 자기장 하에서 전자빔이 전자빔 에너지에 따라 상이하게 굴절됨을 이용하여 전자빔 에너지를 측정하였고, Beam Current Monitor를 이용하여 LINAC에서 가속되어 출력부로 진행되는 가속 전자빔 전류를 측정할 수 있도록 개발됨. 이와 더불어, 가속 전자빔이 YAG Screen에 충돌함으로써 발생하는 가시광을 CCD 카메라를 이용하여 가속 전자빔의 전자빔 지름(Diameter)를 측정할 수 있도록 하였음.

라. 가속관 Commissioning

통합 구성된 LINAC System의 특성 테스트에 앞서, LINAC System을 안정적으로 동작시키기 위하여 각각의 하위 시스템에 대한 구동테스트 및 안정화 작업을 진행함.

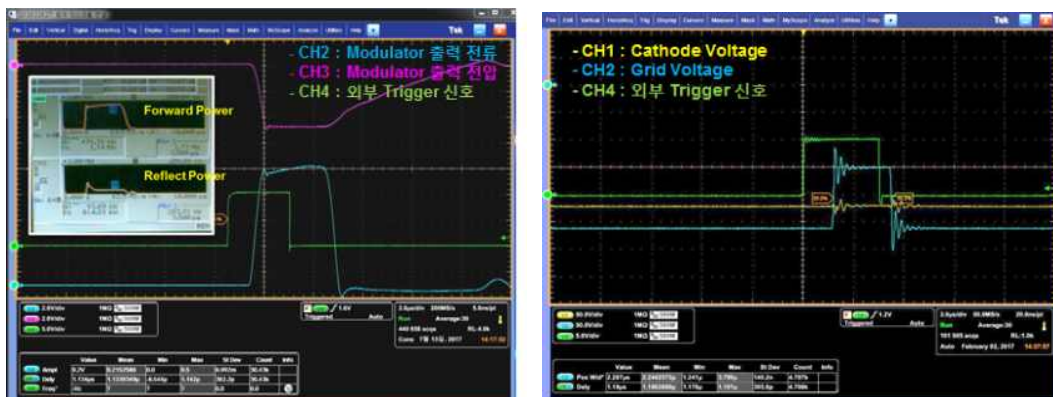
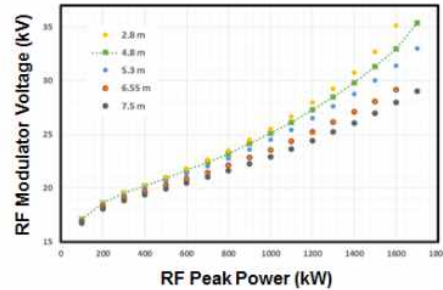


그림 13. 마그네트론 Modulator (좌)와 전자총 Modulator (우) 구동 특성

LINAC System을 통해 6 MeV 전자빔을 발생시키기 위해서는 RF System의 경우, 9.3 GHz 1.7 MW이상 가속관에 공급할 수 있어야 하고, 전자총의 경우 20 kV 이상의 Anode Voltage, 1.1 A - 1.6 A 정도의 Heater 전류 등의 동작 조건을 충족하여야 하므로 이에 대한 성능 테스트를 수행하였음.

RF Modulator에서 마그네트론으로 공급되는 RF Pulse 전압 및 전류 파형은 두 장치 사이에 연결된 고전압 케이블의 길이 변화로 인한 Capacitance 값의 변화에 영향을 받음. 마그네트론의 최대 출력 Power 근처에서 펄스 파형이 Flat한 형태가 되도록 고전압 케이블의 길이에 따른 RF 파형 특성을 분석하였고, 케이블 길이가 4.8 m일 때, 최대 출력상태에서의 Flatness 특성이 가장 좋은 결과를 보였음.

[고전압 Cable 길이에 따른 RF Power 특성]



[HV Cable Specification]

- Voltage rating : 75 kVDC / 3 Conductor
- Nominal outside diameter : 16.7 mm / 0.657 inch



L3 Cable (Claymount)

L3/Locaflex

- Voltage rating: 75 kVDC
- Nominal outside diameter: 16.7mm / 0.657 inch
- 3 conductor

[고전압 Cable 길이에 따른 RF 파형 특성]

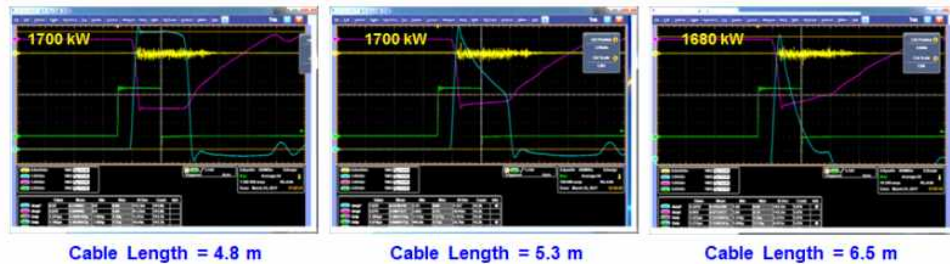


그림 14. 고전압 Cable 특성에 따른 마그네트론 전압 및 전류 파형 변화

RF Power와 PRF (Pulse Repetition Frequency) 값이 증가하게 되면 LINAC System에서 발생하는 전자빔 또는 X-ray 특성이 증가하나, LINAC의 요소시스템들에 부하가 가중됨에 따라 시스템의 안정성은 감소하는 경향이 있음. 따라서 RF 특성 값의 변화에 따른 시스템의 온도 특성 변화를 측정하고 이에 대한 분석을 진행함.

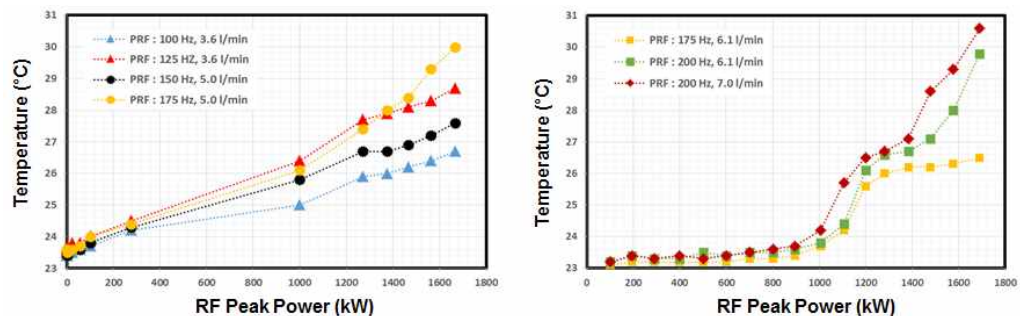


그림 15. PRF 값 변화에 따른 LINAC 온도 변화

RF Power를 1.7 MW 정도로 설정한 상태에서 PRF 값을 증가시켜가며 LINAC 시스템의 온도변화를 측정하였고, 동시에 Chiller의 냉각조건 변화에 따른 온도변화 또한 측정하였음. PRF 값이 150 Hz 일 때, Chiller로부터 공급되는 냉각수 유량이 5 l/min 정도가 유지되면 LINAC 시스템이 30도 이내에서 안정적으로 구동가능함을 확인하였음. PRF 값을 설정 최대치인 200 Hz로 설정할 경우에는 냉각수 유량이 6.12 l/min 이상으로 유지되어야하며, 가속관의 온도가 33도까지 상승하는 경향을 보였음. (Chiller 설정 온도 = 22도)

개발된 X-Band LINAC의 RF 전송효율 특성을 분석하기 위하여 인가되는 RF Power를 증가시켜가며 Forward Power와 Reflection Power의 변화 추이를 측정하였고, RF Peak Power = 1.7 MW 일 때, AFC 동작을 통해 약 87 % 이상의 전송효율 유지가 가능함을 확인하였음.

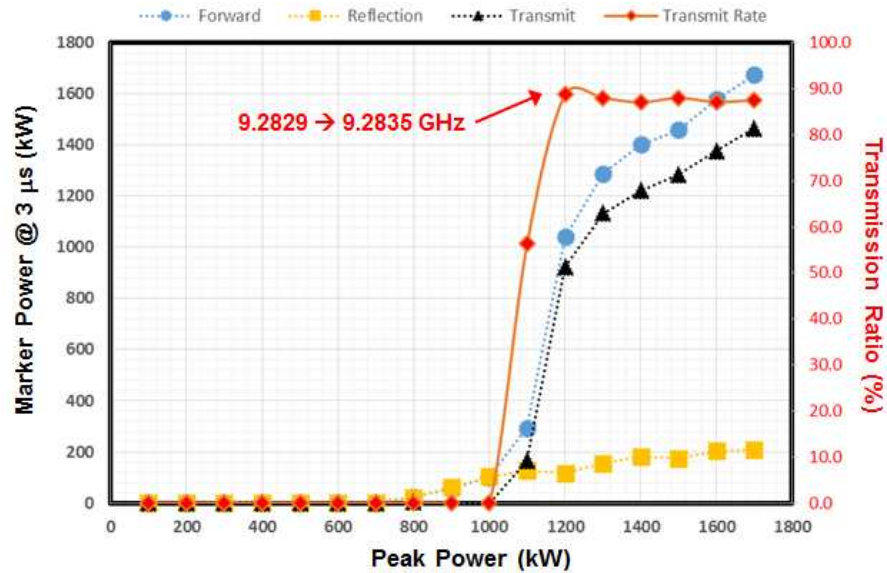


그림 16. RF Power 증가에 따른 RF 전송효율

RF Commissioning, 전자총 Activation 등 일련의 Commissioning 과정 간에 설정된 주요사양은 아래와 같음.

주요성능 Parameter	성능 값	주요성능 Parameter	성능 값
RF Power	1.7 MW	Anode Voltage	22.4 kV
RF Pulse Width	4 μs	Heater Current	1.6 A
RF PRF (Pulse Repetition Frequency)	200 Hz	Pulse Width	4 μs
Magnetron Heater Current	13.6 A	PRF (Pulse Repetition Frequency)	200 Hz

표 1. RF Commissioning과 전자총 Activation 과정에 설정된 주요사양

마. 가속 전자빔 특성

RF System 및 전자총 System의 성능 사양이 아래의 표와 같았을 때, 전자빔 진단장치에서 전자빔 전류값의 경우 최대 14 mA, 전자빔 에너지의 경우 최대 6 MeV 정도가 측정되었음.

성능 Parameter	설정 값
RF Power (Peak)	1.7 MW
RF Pulse Width	2.5 μ s
RF PRF (Pulse Repetition Frequency)	100 Hz
E-gun Anode Voltage	17 kV
E-gun Heater Current	1.5 A
E-gun Pulse Width	2.28 μ s

표 2. RF System 및 전자총 System의 구동 사양

전자빔 출력값에 주요하게 영향을 미칠 것으로 판단되는 RF Power 값과 전자총 Heater 전류값을 변화시키며 그에 따른 전자빔 출력 특성 변화를 측정하였으며 결과는 아래의 그림과 같음.

전자총 Heater 전류값을 1.4 A에서 1.6 A 까지 변화시켰을 경우, 전자빔이 전자총 Heater 전류값에 비례하여 소량 증가하는 경향을 보였으며, RF Power의 경우에도 증가폭이 RF Power가 Fluctuation되는 범위 이상으로 증가할 경우, 비례하여 증가하는 것을 확인할 수 있었음.

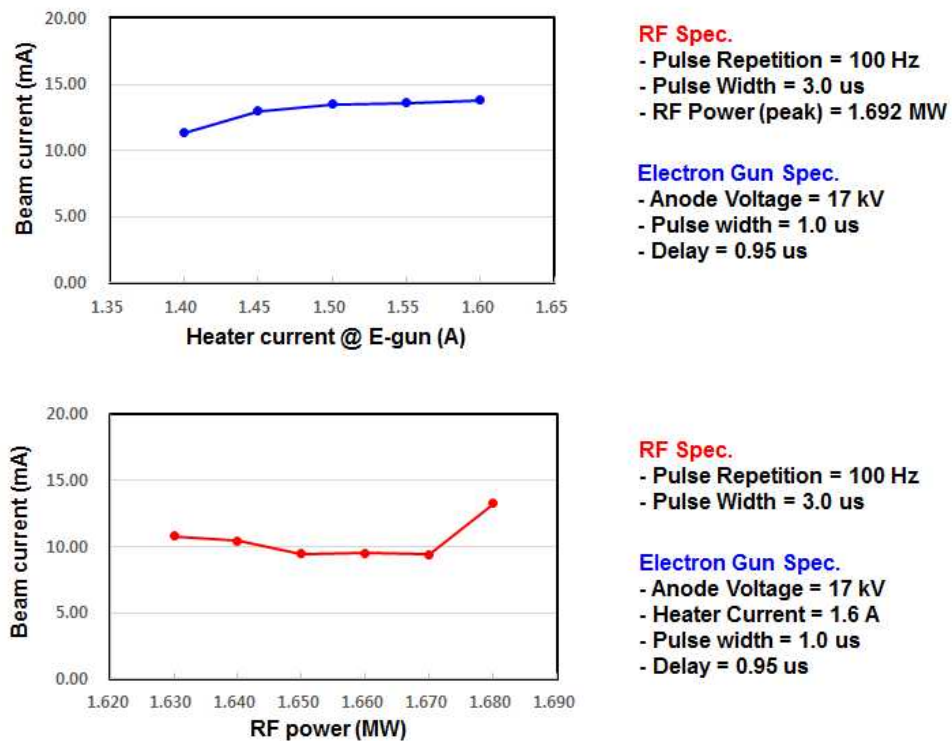


그림 17. Heater 전류(위)와 RF Power(아래) 변화에 따른 가속 전자빔 특성

3. LINAC System 구동 조건에 따른 X-ray 특성 평가

가. X-ray Target 장착한 LINAC System 구성

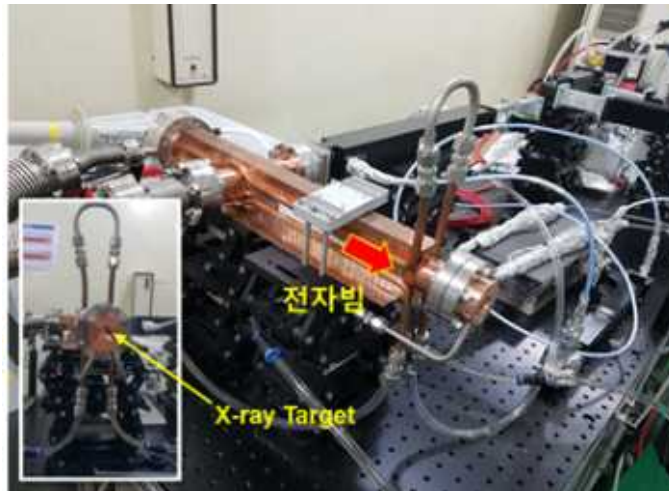


그림 18. X-ray Target이 장착된 X-Band LINAC System

방사선치료에 사용되는 X-ray를 발생시키기 위하여 가속 전자빔 특성 분석 후 전자빔 진단장치를 분리하고, 가속 전자빔으로부터 X-ray를 발생시키기 위해 전자빔 출력부에 X-ray Target를 장착함.

LINAC 시스템에서 가속된 전자빔이 텅스텐 재질의 X-ray Target과 충돌하게 되면 X-ray가 발생하게 되며, 이는 LINAC 시스템의 중요한 성능 지표가 됨. 따라서 LINAC 시스템 구성품 조건 변화에 따른 X-ray 특성 변화를 분석함으로써 LINAC 시스템의 X-ray 발생 특성을 최적화함.

나. System 구성품 조건에 따른 X-ray 특성

LINAC 시스템의 중요한 성능지표인 X-ray 발생 특성을 최적화하기 위하여 전자총 시스템과 RF 시스템의 다양한 요소 변수들을 변화시켜가며, 조건 변화에 따른 X-ray 출력 특성 변화를 측정함.

(1) 전자총 조건 변화에 따른 X-ray 특성 변화

전자총 시스템에서는 Anode 전압, Heater 전류, Grid 전압, Grid 전압의 Pulse Width 및 Delay 값에 대한 조건 변경이 가능하므로 이러한 변수들의 조건 변화에 따른 X-ray 발생 특성 변화를 실험함.

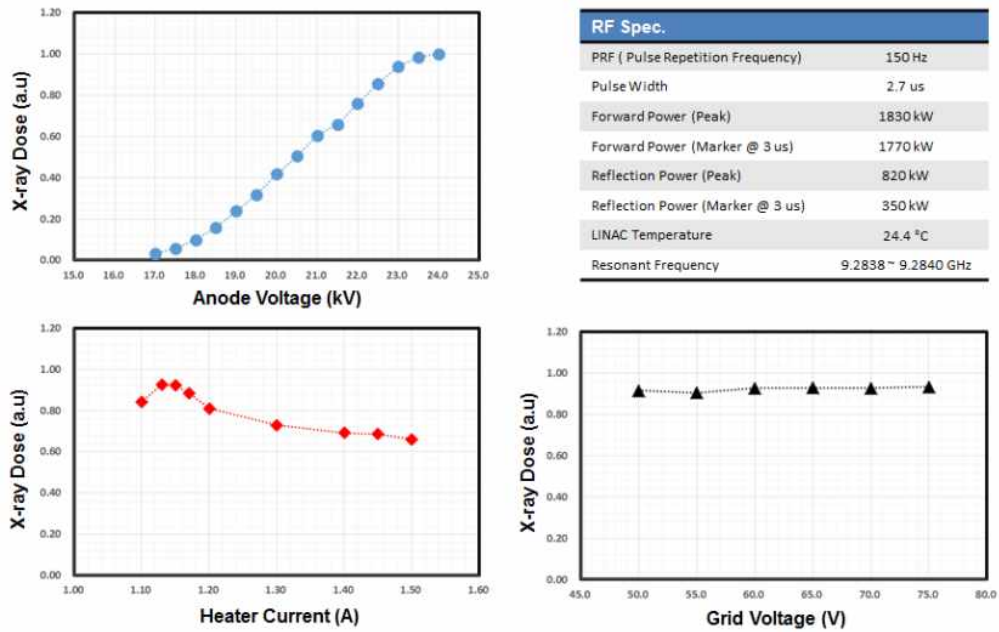


그림 19. 전자총 Anode 전압, Heater 전류, Grid 전압 특성 변화에 따른 X-ray 특성

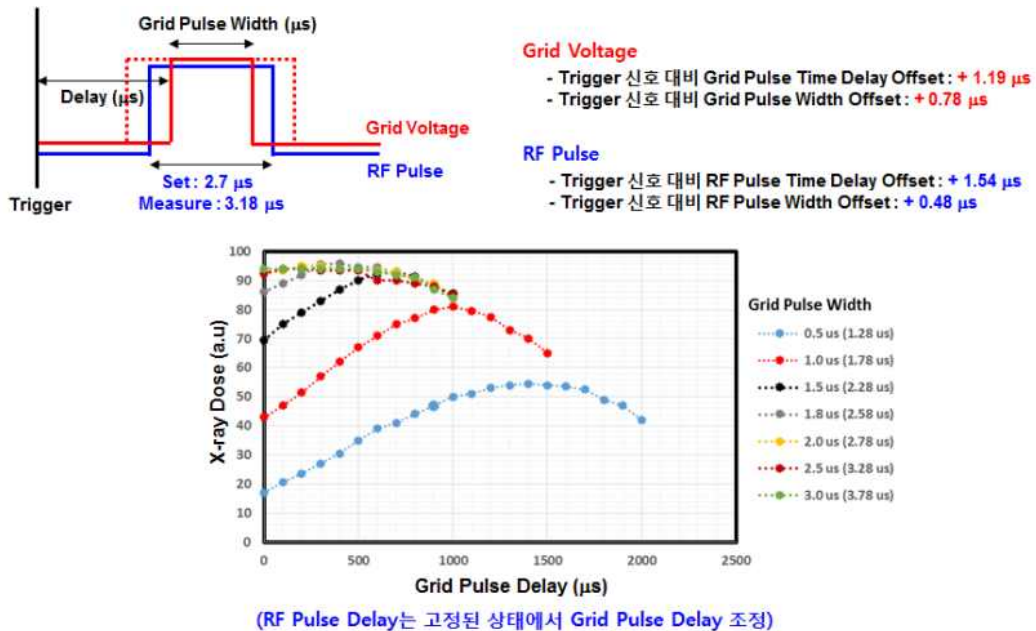


그림 20. 전자총 Grid Pulse Width 및 Delay 변화에 따른 X-ray 특성

LINAC 시스템에서 발생하는 X-ray 출력은 Anode 전압 변화에 비례하여 변화하는 경향을 보였으며, Heater 전류의 경우, 특정 설정 값인 1.15 A에서 출력 특성이 최대가 됨을 확인하였음. 또한, Grid 전압 변화는 X-ray 출력 변화에 크게

영향을 주지 않는 것으로 측정 되었으며, 다만, Grid 전압의 Pulse Width와 Delay 조건이 RF Power의 Delay 조건과 동기화 되었을 경우, Pulse Width 값이 일정 범위 이내에서 증가함에 따라 비례하여 증가하는 경향을 보였음.

(2) RF Power 변화에 따른 X-ray 특성

LINAC 시스템에서 발생하는 X-ray 출력은 전자총 Anode 전압 변화와 더불어 LINAC 시스템으로 공급되는 RF Power의 변화에 가장 뚜렷하게 영향을 받았으며 아래의 그래프에서 보는 바와 같이 RF 전송효율과 진공상태가 일정하게 유지될 경우, RF Power 증가에 선형적으로 비례하는 특성을 보였음.

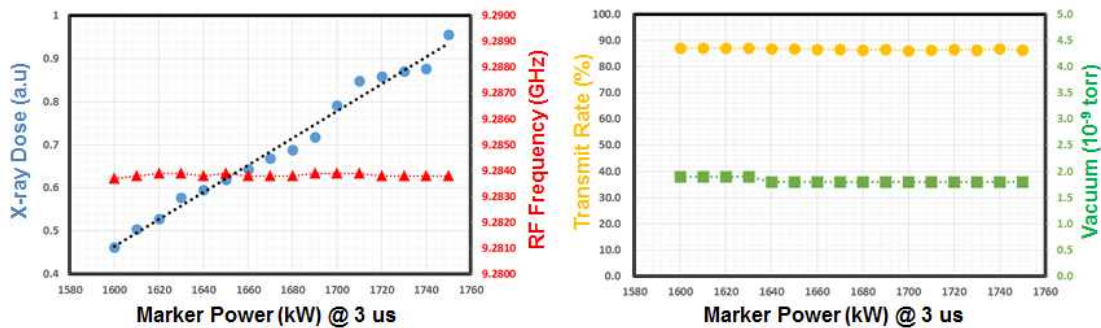


그림 21. RF Power 변화에 따른 X-ray 특성

(3) RF Frequency 변화에 따른 X-ray 특성

개발된 X-Band LINAC 가속관은 24도 정도로 온도가 유지될 경우, 9.2840 GHz의 공진주파수에서 최대의 X-ray 발생 특성을 보였으며, 공진주파수 최대 발생 주파수 지점과 Reflection이 최소인 주파수 지점 간에는 약간의 주파수 오프셋이 존재하는 것처럼 측정 되었으나, 이는 RF Calibration 과정에서 발생한 미세한 오차로부터 기인한 것으로 판단됨.

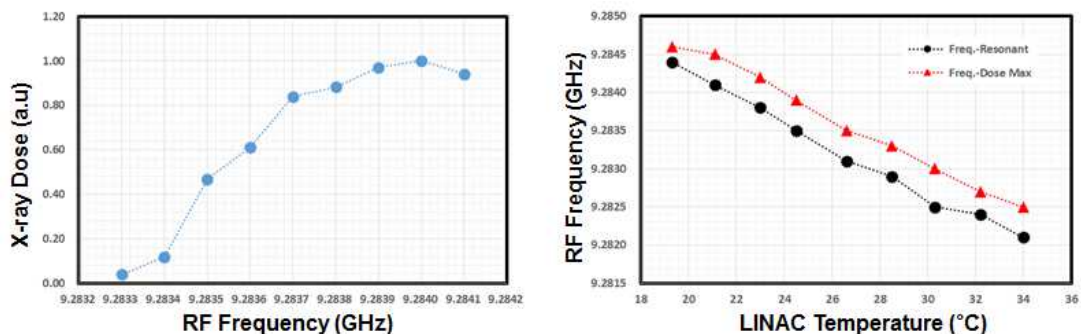


그림 22. RF Frequency 변화에 따른 X-ray 특성

다. LINAC System X-ray 특성

(1) QA (Quality Assurance) Protocol 개발

(가) Reference Data

- 한정된 실험 조건 및 높은 측정값 (전하량)으로 Dosimetry QA를 진행하기 위해 SSD 80 cm로 진행하였음. (X-Band LINAC을 사용하는 CyberKnife의 경우 SSD 80 cm로 QA 진행)
- 실험 조건에 맞는 Reference Data를 구하기 위해 SSD = 100 cm에서의 Reference Data를 Mayneords F-factor를 사용하여 SSD = 80 cm에서의 Data로 변환함.

$$\text{Mayneords } F\text{factor} = \left[\frac{(SSD_1 + d)(SSD_2 + d_{\max})}{(SSD_2 + d)(SSD_1 + d_{\max})} \right]^2$$

MV	Depth (mm)	Percent	PDD _{20,10}
⁶⁰ CO	100	58.7 %	0.49
	200	28.9 %	
4	100	64.8 %	0.55
	200	35.6 %	
6	100	66.7 %	0.57
	200	38.3 %	

표 3. 조사면 10 cm × 10 cm, SSD 100 cm에서의
PDD (Percent Depth Dose) Reference Data

$$PDD_2 = PDD_1 \times F = PDD_1 \left[\frac{(SSD_1 + d)(SSD_2 + d_{\max})}{(SSD_2 + d)(SSD_1 + d_{\max})} \right]^2$$

MV	Depth (mm)	Percent	PDD _{20,10}
⁶⁰ CO	100	55.6 %	0.49
	200	27.2 %	
4	100	62.3 %	0.53
	200	33.0 %	
6	100	64.2 %	0.56
	200	35.7 %	

표 4. 조사면 10 cm × 10 cm, SSD 80 cm로 변환한 PDD Reference Data

(나) Open Field에서의 Beam Commissioning

- Open Field에서의 Field Size와 Profile 확인
- 상용화된 장비의 6 MV Beam을 SSD = 80 cm에서 $PDD_{20,10}$ 을 구하여 값 비교를 통해 Beam 평가
- 목표 스펙을 달성하고자 RF Power, Pulse Width, PPS (Pulse per Second), 전자총 Anode, Heater 등의 조정으로 선량률 (Doserate) 반복 측정

① Open Field에서의 Field Size 확인

- 빛을 이용한 field size 확인 실험

[실험방법 및 조건]

실험조건	
Source-Surface Distance (SSD)	80 cm
Measured Depth	Surface
Field Size	Open field

- i. 불을 끈 병커 내에서 선원 위치에서 Primary Collimator에 빛을 투과시킴
- ii. 선원으로부터 80 cm 거리에 종이를 위치시킴
- iii. 종이 위에 그려진 빛 Field의 지름을 측정함

- Gafchromic Film (EBT3)을 이용한 Field Size 확인 실험

[실험방법 및 조건]

실험조건	
Source-Surface Distance (SSD)	80 cm
Measured Depth	Surface
Field size	Open Field

- i. 선원으로부터 Solid Water Phantom의 Surface까지의 거리(SSD)는 80 cm로 Setup함
- ii. Solid Water Phantom의 Surface에 Gafchromic Film (EBT3) 부착
- iii. Film 스캐너 (VIDAR, DosimetryPRO Advantage)를 사용하여 24시간 후 스캔
 - Image Type : 16 bit
 - Resolution : 72 dpi
 - 색 보정 없음

- iv. Background 값을 제거하기 위해 방사선을 조사하지 않은 Film도 동일한 조건으로 스캔
- v. 원 모양으로 감광된 영역의 지름 측정
- vi. Cross-Line을 그어 각 Pixel마다 Gray Scale를 측정
- vii. Optical Density 값으로 변환
- viii. Pixel에 대한 Optical Density 값을 그래프로 표현하여 50% Width 측정

② Lateral Water Phantom 및 QA Solution 프로그램을 이용하여 상용화된 6 MV LINAC과의 Energy 평가

- 개발한 Lateral Water Phantom, PC Electrometer, Edge Detector 이용
[실험방법 및 조건]

실험조건	
Source-Surface Distance (SSD)	80 cm
Measured Depth	0 - 2 cm : 0.1 cm 간격 2 - 25 cm : 0.5 cm 간격
Field size	Open Field

- i. 온도, 기압에 따른 차이를 보정하기 병커 내 온도, 기압에 대한 보정 계수를 산출
 - 온도 : 21.5 °C
 - 기압 : 100.28 kPa
 - 온도 기압 보정계수 ($P_{T,P}$) : 1.009
- ii. 각 깊이에 대하여 전하량 (nC) 측정
- iii. 측정 Data를 QA Solution 프로그램에 Import
- iv. 계산된 값 및 그래프 확인
- v. 가톨릭대학교 서울성모병원 방사선종양학과 Siemens LINAC을 비교대상으로 선택

실험조건	
Source-Surface Distance (SSD)	80 cm
Measured Depth	1, 1.5, 3.5, 5, 10, 20 cm
Field Size	30 cm × 30 cm

- vi. 개발된 LINAC의 Open Field Size는 약 33 cm 이므로, 30 cm × 30 cm으로 Setting하여 개발한 LINAC과 유사한 조건으로 맞춤

- vii. 표준기관에서 교정 받은 Farmer Type Ionization Chamber (FC-65G)와 Electrometer (Dose1) 사용
- viii. 온도, 기압에 대한 보정을 위하여 실험실 내 온도 및 기압을 측정
 - 온도 : 23 °C
 - 기압 : 100.9 kPa
 - 온도 기압 보정계수 ($P_{T,P}$) : 1.014
- ix. 각 깊이에 대하여 1분 동안 3회씩 전하량 (nC) 측정
- x. 최댓값을 기준으로 전하량을 Normalize하여 PDD Curve를 얻음
- xi. 깊이 20 cm, 10 cm에서의 흡수선량 비인 $PDD_{20,10}$ 을 계산하여 Energy 비교함

③ Beam Profile 측정

[실험방법 및 조건]

실험조건	
Source-Surface Distance (SSD)	80 cm
Measured Depth	dmax (1.5 cm)
Field Size	Open Field

- i. 선원으로부터 Solid Water Phantom의 Surface까지의 거리 (SSD)는 80 cm로 Setup함
- ii. Solid Water Phantom의 1.5 cm 깊이에 Gafchromic Film (EBT3) 부착
- iii. Film 스캐너 (VIDAR, DosimetryPRO Advantage)를 사용하여 24시간 후 스캔
 - Image Type : 16 bit
 - Resolution : 72 dpi
 - 색 보정 없음
 - Background 값을 제거하기 위해 방사선을 조사하지 않은 Film도 동일한 조건으로 스캔
- iv. In-line과 Cross-line을 그어 각 Pixel마다 Gray Scale를 측정
- v. Optical Density 값으로 변환
- vi. Pixel에 대한 Optical Density 값을 그래프로 표현하여 50% Width 측정

④ 선량률(Doserate)

[실험방법 및 조건]

실험조건	
Source-Surface Distance (SSD)	80 cm
Measured Depth	1, 1.5 cm
Field Size	Open Field

- i. 표준기관에서 교정 받은 Farmer Type Ionization Chamber (PTW 30013)와 Electrometer (PTW UNIDOSE) 사용
- ii. 최대선량깊이로 간주되는 1 cm, 1.5 cm 깊이에 Ionization Chamber를 위치시킴
- iii. 병커 내 온도와 기압을 측정하여 Chamber 교정 시 표준기관에서 사용되는 측정 조건과 실험 측정 조건과의 차이를 보정
- iv. 각 깊이에서 2분 동안 3회씩 이온화 전류 (전하량) 측정
- v. 측정 깊이 1 cm와 1.5 m에서의 분당 선량률 (cGy/min) 비교

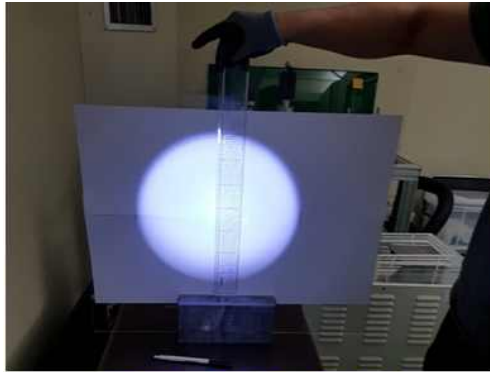
(2) QA Protocol를 이용한 X-ray 특성 측정

(가) Beam Profile 측정

LINAC 시스템에서 발생하는 X-ray의 Field Size 및 모양은 X-ray Target 다음에 장착되는 Primary Collimator와 Secondary Collimator에 의해서 결정되는데, Primary Collimator의 경우, X-ray의 형태를 결정하는 Hole의 모양이 Tapered 형태이고, Secondary Collimator의 경우, 폭의 변화가 없는 정사각형 형태로 제작되었음.

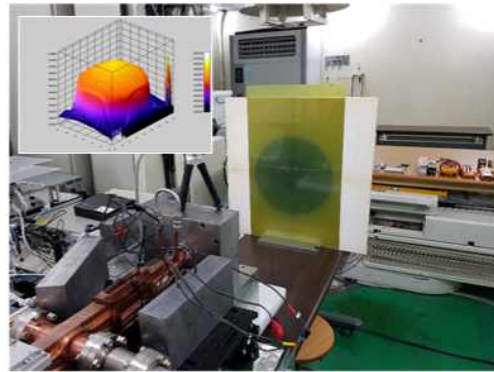
Primary Collimator에 의한 X-ray Profile을 확인하는 실험을 두 가지 방법으로 진행하였으며 이를 통해 Field Size를 확인하였음. 첫 번째 방법은 손전등을 이용하여 조사되는 X-ray의 Field Size를 확인하는 방법으로써, SSD = 80 cm인 지점에서 약 33 cm정도의 지름을 갖는 원 형태로 조사면이 형성되는 것을 확인하였음.

두 번째 방법은 Gafchromic EBT3 Film을 활용하는 방법으로써, 실제로 X-ray를 감광필름에 조사한 후, 감광된 필름을 분석프로그램을 사용하여 X-ray의 2D와 3D Profile을 측정하였음. 이 경우에도 X-ray가 조사된 면의 Field Size가 지름 33 cm 정도의 원 형태로 감광되는 것을 확인할 수 있었음.



빛을 이용한 Field Size 확인 실험

Experiment Condition & Result	
Source-Surface Distance (SSD)	80 cm
Measured Depth	Surface
X-ray Irradiation Time	-
Field Size (Set)	Open Field
Field Size (Measured)	33 cm

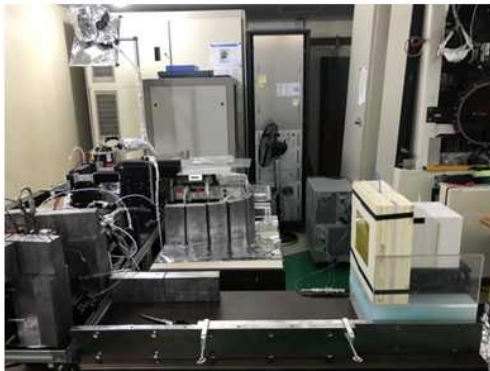


Gafchromic Film을 이용한 Field Size 확인 실험

Experiment Condition & Result	
Source-Surface Distance (SSD)	80 cm
Measured Depth	Surface
X-ray Irradiation Time	12 min
Field Size (Set)	Open Field
Field Size (Measured)	33 cm

그림 23. X-ray Beam Profile 측정 결과

(나) X-ray 에너지 측정



Solid Water Phantom을 이용한 Energy 측정 실험

Experiment Condition & Result	
Source-Surface Distance (SSD)	100 cm
Field Size (Set)	Open Field
Measured Depth	1, 1.5, 5, 10, 20 cm
Percent Depth Dose (PDD _{20,10})	0.584
Tissue Phantom Ratio (TPR _{20,10})	0.680

$$* \text{TPR}_{20/10} = 1.2661 \times \text{PDD}_{20/10} - 0.0595$$

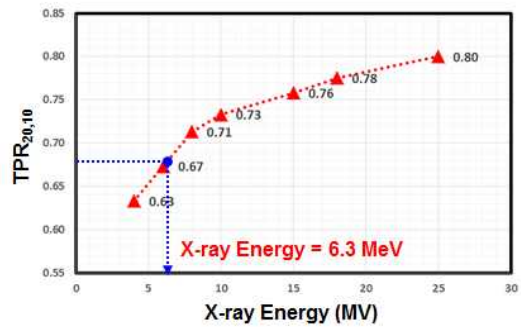
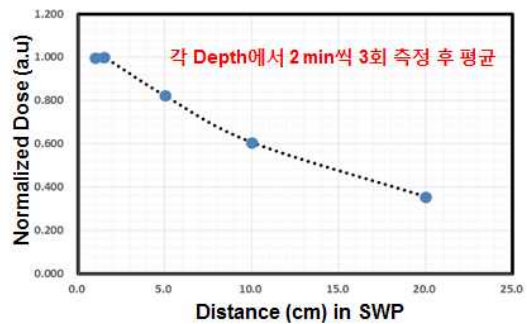


그림 24. Solid Water Phantom을 이용한 X-ray Energy 측정

LINAC 시스템에서 발생하는 X-ray의 에너지 특성을 측정하기 위하여 물과 동일한 물성을 갖는 Solid Water Phantom과 Farmer Type 이온챔버를 사용하여 X-ray 발생으로 인한 순간 전류값 변화 및 누적 전하값을 측정함. X-ray의 에너지 특성은 X-ray가 Solid Water Phantom을 투과함에 따라 감소하게 되는 Doserate 변화의 기울기 특성을 토대로 PDD (Percent Depth Dose) 값을 계산함으로써 산출할 수 있으며, 이 경우, 에너지 측정을 위한 표준 프로토콜을 기준으로 하였음.

SSD는 1 m를 기준으로 하였으며, 측정 오차를 줄이기 위하여 이온 챔버가 위치하게 되는 특정 위치에서 3회 측정을 실시한 후, 평균을 내는 방식으로 실험을 진행하였음. 측정된 PDD 값과 TPR (Tissue Phantom Ratio) 결과를 토대로 개발된 LINAC 시스템에서 6.3 MV의 X-ray가 발생됨을 확인함.



Lateral Water Phantom을 이용한 Energy 측정 실험

Experiment Condition & Result	
Source-Surface Distance (SSD)	80 cm
Field Size (Set)	Open Field
6 MV Reference Data (PDD _{20,10}) @ 10 x 10 cm	0.556
6 MV Reference Data (PDD _{20,10}) @ Open field	0.61
Percent Depth Dose (PDD _{20,10})	0.56

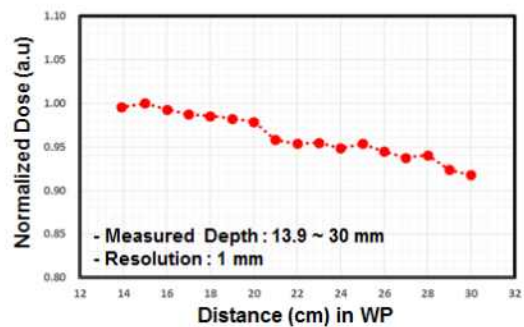
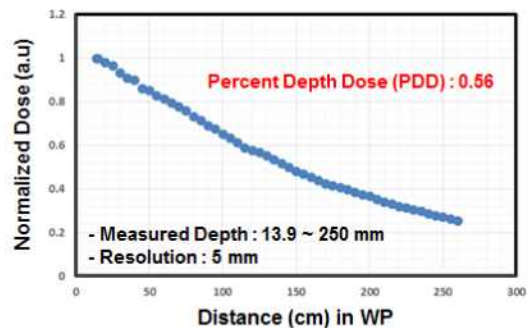


그림 25. Water Phantom을 이용한 X-ray Energy 측정

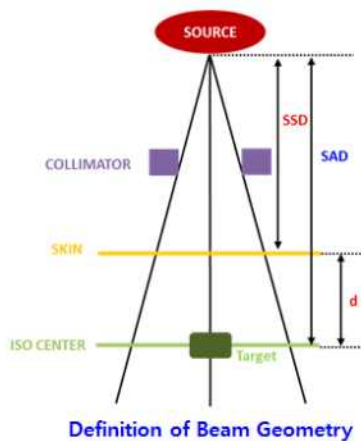
X-ray 에너지 측정은 Solid Water Phantom을 이용한 방식 이외에 실제 Water Phantom을 이용한 방식으로도 수행되었으며, Water Phantom을 이용한 방식의 경우, 모터를 사용하여 이온 챔버의 위치를 상대적으로 보다 정밀하게 조절하며 에너지 측정 실험을 수행하였음. Water Phantom을 이용하여 측정된 X-ray Energy의 경우, Solid Water Phantom에서 측정된 값 보다 낮은 값으로 측정이 되었는데 이와 같은 측정 실험환경 변화에 따른 결과 차이를 보완하기 위한 실험을 추가적으로 진행할 예정임.

(다) Doserate 측정

X-ray Energy 측정과 마찬가지로 Solid Water Phantom과 Farmer Type 이온 챔버를 사용하여 측정하였으며 최대 선량 깊이로 간주되는 1 cm와 1.5 cm 깊이 에 이온 챔버를 위치시킨 후, 실험을 진행함. 측정되는 Doserate 특성은 측정 환경에 따라 그 값이 달라지는데, 다수의 경우, SSD (Source to Surface Distance)를 1 m 또는 80 cm로 설정하고 측정하므로, 이러한 프로토콜을 기반으로 실험을 진행하였음.

다양한 구조적 조건 환경에서의 특성 변화를 확인하기 위하여 SAD (Source Axis Distance)가 80 cm인 경우에도 실험을 진행하였으며 결과는 그림 26 과 같이 측정되었음.

RF Pulse Rate를 150 Hz, RF Pulse Width를 3 μ s, 전자총 Anode 전압과 Heater 전류값을 각각 22 kV, 1.15 A로 설정하고 RF Peak Power를 1.7 MW까지 증가시켰을 때 X-ray Doserate 값이 약 53 cGy/min (SSD : 80cm 기준)까지 증가 하는 것을 확인하였음.



Experiment #3 : SAD = 80 cm

Set-up	
Source-Axis Distance (SAD) / Depth (cm)	80 / 1.0
RF Power (peak) (kW) / PRF (Hz)	1755 / 150
E-gun Anode Voltage (kV) / Heater Current (A)	22 / 1.15
Dose Rate (cGy/min)	55.2

Experiment #1 : SSD = 80 cm

Set-up	
Source-Surface Distance (SSD) / Depth (cm)	80 / 1.5
RF Power (peak) (kW) / PRF (Hz)	1765 / 150
E-gun Anode Voltage (kV) / Heater Current (A)	22 / 1.15
Dose Rate (cGy/min)	47.1

Experiment #2 : SSD = 100 cm

Set-up	
Source-Surface Distance (SSD) / Depth (cm)	100 / 1.5
RF Power (peak) (kW) / PRF (Hz)	1780 / 150
E-gun Anode Voltage (kV) / Heater Current (A)	22 / 1.15
Dose Rate (cGy/min) @ SSD = 100 cm	34.28
Dose Rate (cGy/min) @ SSD = 80 cm (환산)	53.6

Experiment #4 : SSD = 80 cm

Set-up	
Source-Surface Distance (SSD) / Depth (cm)	80 / 1.0
RF Power (peak) (kW) / PRF (Hz)	1760 / 150
E-gun Anode Voltage (kV) / Heater Current (A)	22 / 1.15
Dose Rate (cGy/min)	55.0

그림 26. Doserate 측정 결과

제 2절. Coupling 특성 향상된 X-Band LINAC 가속관 개발

1. Coupling 특성 향상된 X-Band LINAC 설계

가. 3D PIC Simulation 기반 X-Band LINAC 전자빔 가속 특성

X-Band LINAC에서 가속되는 전자빔의 에너지 특성과 가속전자빔 전류 특성을 향상시키기 위해, LINAC 가속관 내부에서 전자기파 Coupling 구조와 마그네트론에서 발생한 RF 에너지를 입력하기 위한 RF Coupler 구조를 최적화하여 Coupling 특성이 향상된 X-Band LINAC 구조를 설계함.

Coupling 특성 향상된 X-Band LINAC 가속관의 특성 검증을 위하여 시간영역 3차원 시뮬레이션 구조를 개발하였으며, RF Coupler Port에서의 반사특성인 Reflectance S_{11} (dB) 특성이 X-Band LINAC 동작 Mode인 $\pi/2$ -mode에서 -13.1 dB에서 -18.9 dB로 향상되었음.

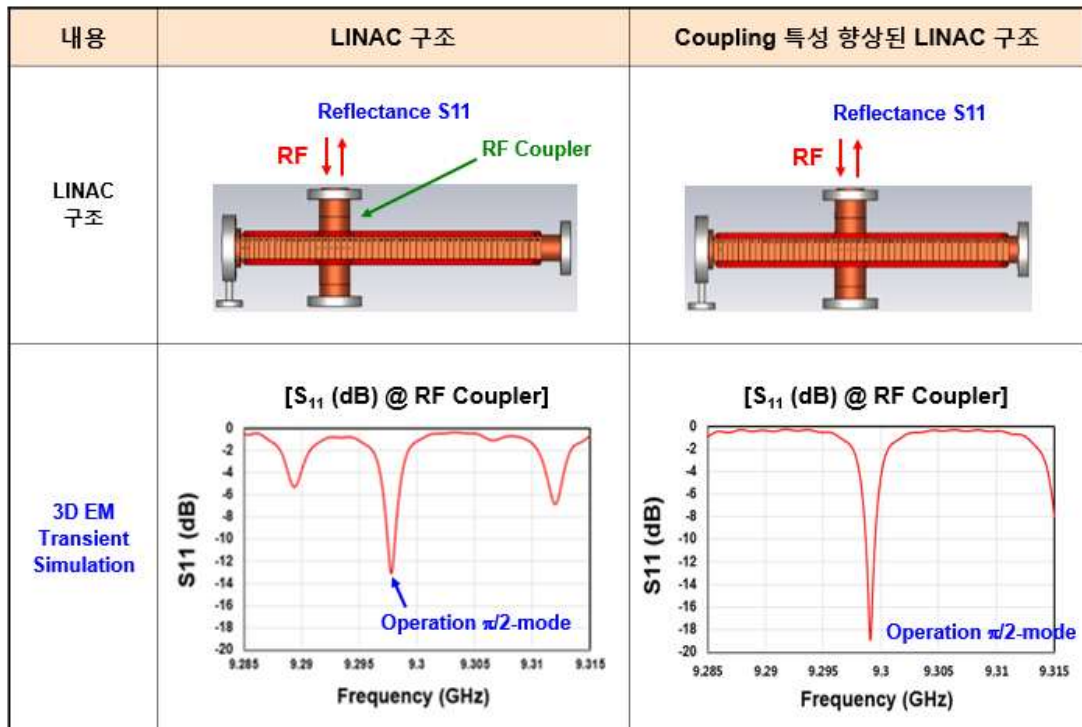


그림 27. Coupling 특성 향상된 LINAC 구조의 Reflectance S_{11} 특성

Coupling 특성 향상으로 6 MeV 에너지를 갖는 전자빔을 발생시키기 위해 필요한, 가속관 공진기의 Unit Cell수를 25에서 24로 줄일 수 있었고, 이로 인해 LINAC의 길이는 421 mm로 줄어들었음.

Coupling 특성 향상된 X-Band LINAC의 전자빔 가속 특성을 검증하기 위해, 3차원 PIC (Particle-In-Cell) 전자빔 시뮬레이션을 이용하여, 전자총 (Electron Gun)이 위치하는 영역에서 20 keV의 에너지를 갖는 초기 전자빔을 발생시키고, RF Coupler에서의 Reflectance S_{11} (dB) 특성을 반영하여 전자빔 가속에 사용되는 RF 에너지를 가속관에 인가하여 가속 전자빔 특성을 측정하였음.

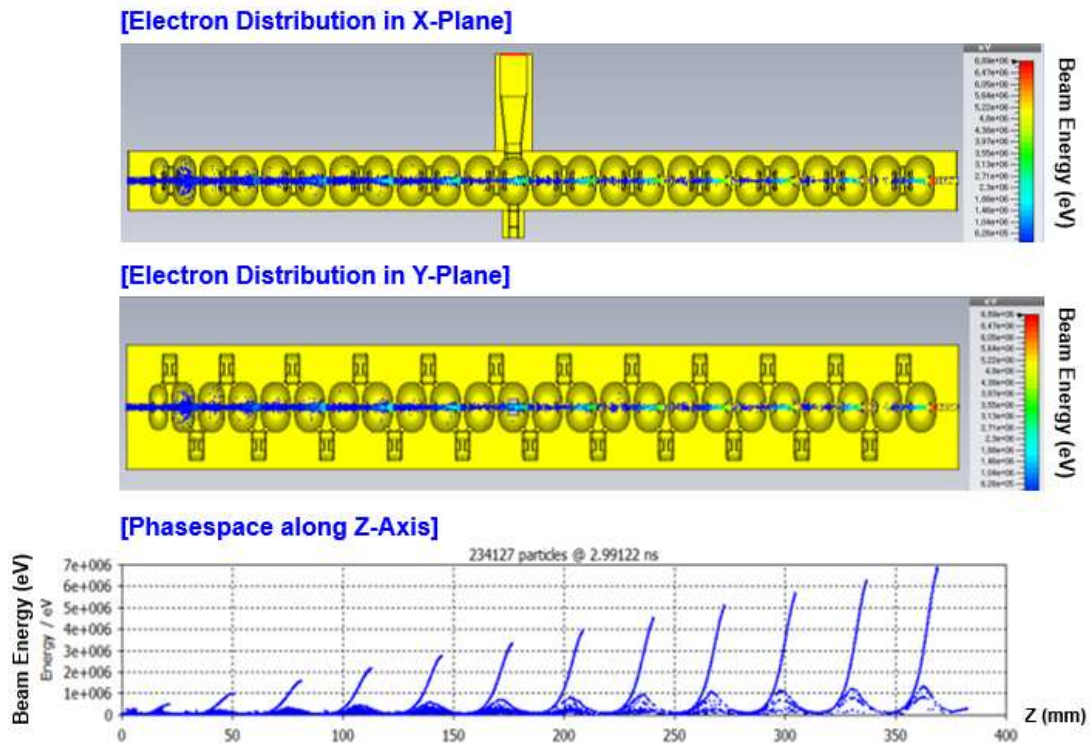


그림 28. Coupling 특성 향상된 LINAC 구조의 전자빔 가속 특성

가속 전자빔이 방출되는 가속관 Output Port에서 가속 전자빔의 에너지를 측정하였고, 전자빔의 Phasespace 결과를 이용하여 전자빔 진행방향인 Z축으로 가속 전자빔의 에너지 결과로부터, 평균 에너지가 6.28 MeV까지 향상됨을 측정함.

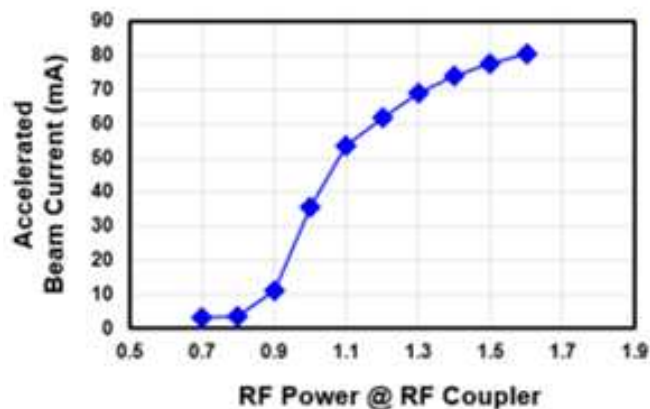


그림 29. 가속관 입력 RF Power에 따른 가속 전자빔 전류 세기

X-Band LINAC의 가속관 입력 RF Power에 따른 가속 전자빔 전류 세기 특성을 보면 RF Power가 0.7 MW에서 1.58 MW까지 올라가면, 가속 전자빔의 전류 세기는 2 mA에서 80 mA까지 향상되는 결과를 얻음.

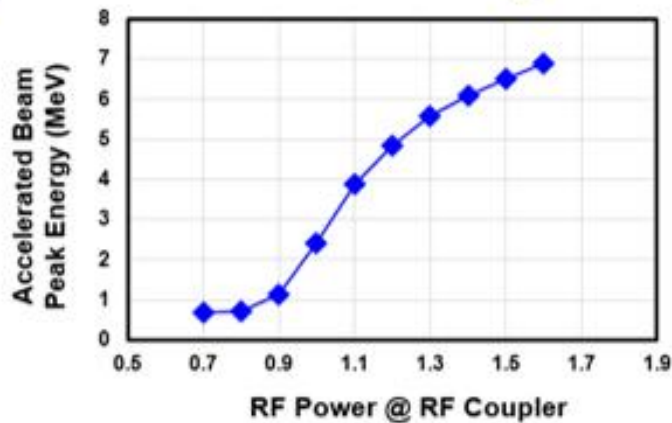


그림 30. 가속관 입력 RF Power에 따른 가속 전자빔 에너지

X-Band LINAC의 가속관 입력 RF Power에 따른 가속 전자빔 에너지 특성을 보면 RF Power가 0.7 MW에서 1.58 MW까지 올라가면, 가속 전자빔의 Peak 에너지는 0.8 MeV에서 6.9 MeV까지 향상되는 결과를 얻음.

나. 구동 조건에 따른 X-Band LINAC 열 분포 해석

(1) Transient State Thermal 해석 (과도상태 해석)

X-Band LINAC 내부에는 마그네트론에 의한 고출력 RF와 전자총에서 방출된 전자빔에 의해 LINAC 내부의 온도가 지속적으로 상승하게 됨. 지속적인 온도의 상승을 방지하기 위해 냉각장치로 Cooling Pipe를 사용하게 되는데, X-Band LINAC에 맞는 Cooling 조건을 결정하기 위해서 열 해석이 필요함. 또한, 열 해석을 통해 LINAC 내부의 열 분포 및 온도 상승에 따른 LINAC 구조 변형 값을 계산할 수 있음.

X-Band LINAC의 열 해석에 앞서, 냉각장치의 사양을 결정하기 위해 유체해석을 실행함. 해석 모델은 난류모델을 선택하였고, 해석 조건으로는 Cooling Pipe 안에 흐르는 물의 온도 25 ℃, 유량 (Flow Rate) 3 l/min으로 설정하였고, 해석 결과 위에 그림 31과 같이 냉각수의 유속 분포를 알 수 있으며, 이를 통해 유량에 따른 냉각관 표면의 열 전달계수를 구할 수 있음.

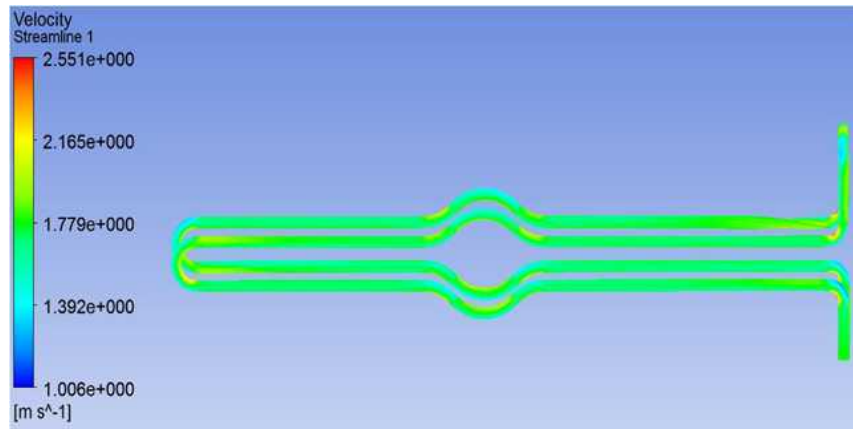


그림 31. Cooling Pipe 내부 유량이 3 l/min일 때의 유속 분포

유체해석을 통해서 구한 열 전달계수와 X-Band LINAC 내부에서 발생하는 에너지 값을 통해 LINAC 구조의 온도 분포를 해석할 수 있음. 열 해석을 위해 LINAC의 구동으로 인해 발생하는 열류는 과도상태 해석으로 연결 시켰고, 열류량은 1000 kW로 4 μ s동안 5 ms마다 주기적으로 발생하는 펄스파 형태로 설정함.

LINAC과 대기의 초기온도는 25 $^{\circ}$ C로 설정하였고, 외부 공기에 의한 열전달계수는 5 W/ m^2 으로 설정함. 열 해석을 위한 시뮬레이션 총 시간은 0.196 s로 설정하였고, LINAC과 Cooling Pipe는 Copper로 설정하였으며 Flange는 Steel로 재질을 선택함.

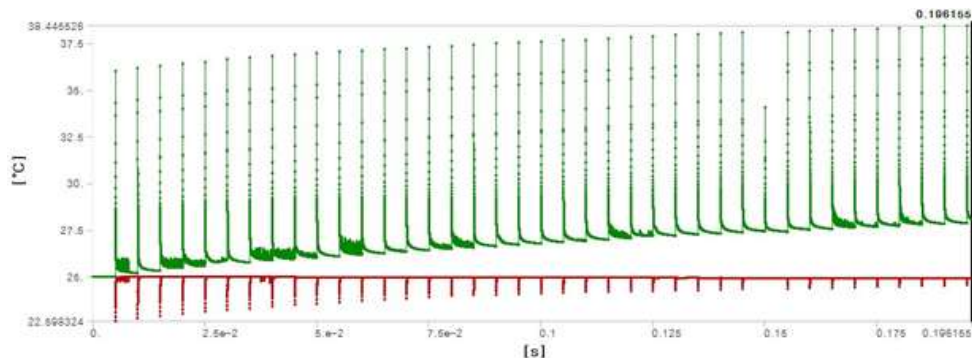


그림 32. 시간에 따른 최고 온도 및 최저 온도 결과

X-Band LINAC 열 해석 결과로부터, 펄스파 형태로 열류량 (Heat Flow)을 입력하면 그림 32와 같이 시간이 지날수록 최고온도가 점점 증가함. 열 해석이 진행되는 동안 최고 온도는 38.445 $^{\circ}$ C이고 최저 온도는 22.598 $^{\circ}$ C임. 열 해석 시뮬레이션 총 시간이 0.198 s로 짧아서 냉각장치가 있어도 온도가 지속적으로 올라가고 있으나, 시간이 더 지나면 안정화되고 온도가 일정한 값으로 안정화 될 것으로 예측됨.

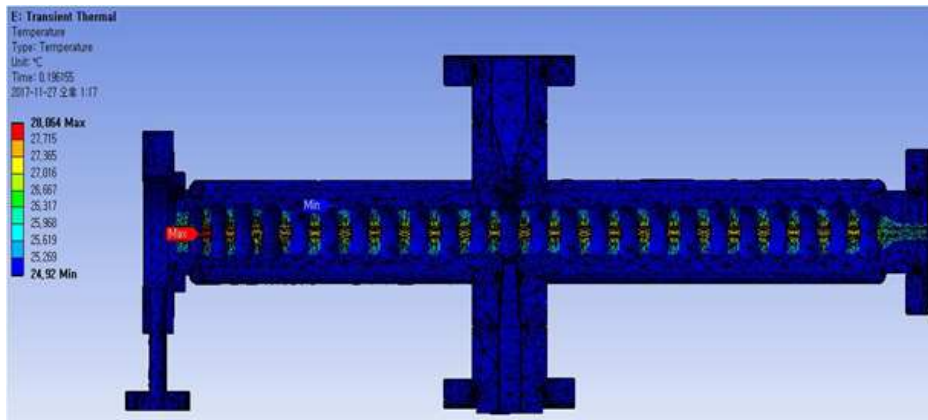


그림 33. 열 해석을 통한 X-Band LINAC의 온도 분포 결과

그림 33은 X-Band LINAC의 온도 분포로서, 냉각장치와 연결된 부분, 열류량이 지나가는 부분과 Flange 영역은 온도가 낮고, LINAC 구동으로 인해 발생하는 열류가 지나가는 각 공진기의 중앙부분은 상대적으로 온도가 높은 특성을 보임.

(2) Steady State Thermal 해석 (정상상태 해석)

과도상태 해석과는 달리 이번에는 정상 상태 해석으로 연결 시켜서, 모든 공진기의 안쪽에 1400 W의 열류량 (Heat Flow)이 지속적으로 발생하도록 설정해서 입력함. LINAC과 대기의 초기온도는 25 ℃로 설정, 외부 공기에 의한 열전달계수는 5 W/m²로 과도상태와 동일하게 설정, 정상 상태 해석은 시간이 오래 걸리지 않으므로 열 해석 시뮬레이션 총 시간을 10 s로 설정한 후, 유량을 0 - 5 l/min까지 변화시켜 가면서 온도 분포를 계산함.

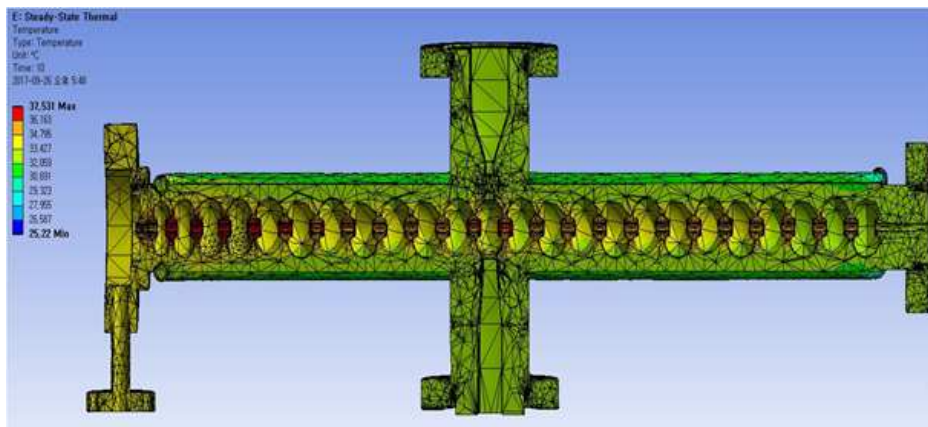


그림 34. Cooling Pipe 내부 유량이 3 l/min일 때 X-Band LINAC의 온도 분포 결과

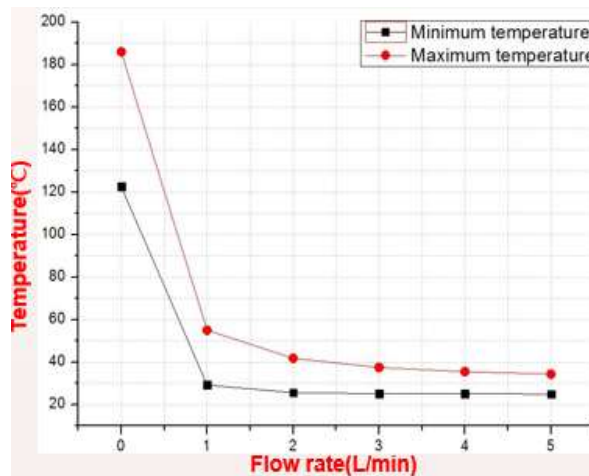


그림 35. Cooling Pipe 내부 유량에 따른 최고 및 최저 온도 변화

그림 34는 유량이 3 l/min일 때, 시뮬레이션이 끝난 후의 온도분포로서, 시뮬레이션이 진행되는 동안 최고 온도는 37.53 °C 이고 최저 온도는 25.22 °C 임. 과도 상태 해석에서 유량이 3 l/min일 때의 최고, 최저온도와 비교해보면 최고온도는 1 °C 정도 낮아졌고, 최저온도는 3 °C 정도 높아짐. 정상 상태 해석에서는 시뮬레이션 시간이 충분해서 조금 더 안정된 값을 보이게 됨.

그림 35는 냉각장치에 흐르는 물의 유량을 0 - 5 l/min으로 설정할 때의 최저, 최고온도 값 결과로서, 유량이 0 l/min으로 냉각장치가 작동하지 않을 때는 최저, 최고온도가 높게 나타나고, 유량이 1 - 5 l/min으로 높아질수록 최저, 최고온도 값은 내려가며 안정화됨.

2. X-Band LINAC 가속관 제작

가. LINAC 가속관 공진기 제작

X-Band LINAC 가속관은 가속관 구성품인 공진기를 제작하고, 특성 평가 후 진공 브레이징 (Vacuum Brazing) 공정을 이용하여 접합을 통해 제작함. 제작된 공진기의 특성 평가를 위해 가속관을 구성하고 있는 개발 공진기에 대한 주파수 특성을 3차원 EM 시뮬레이션을 이용하여 공진기 각 모드별 주파수 특성 분석을 하였음.

그림 36는 가속관 개별 공진기의 공진모드 특성을 보이고 있음. 1개의 공진기는 2개의 공진기 부품으로 구성되어 있으며, 중심부분에 전자빔이 통과되는 Beam Tunnel이 위치하는 Acceleration Section과 위쪽부분에 위치하는 RF 에너지를 공진기로 Coupling 시켜주는 Side Coupler Section으로 구성되어 있음.

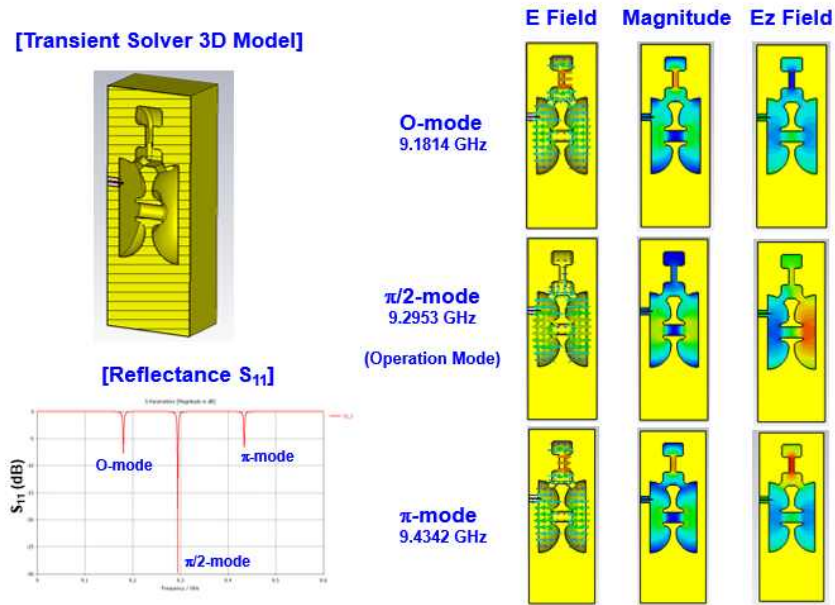


그림 36. 가속관 가속 공진기의 공진모드 특성

2개의 공진회로가 연결된 구조를 갖는 1개의 공진기는 3개의 공진모드를 갖으며, 전자빔 가속에 사용되는 공진모드는 $\pi/2$ -mode가 사용되는데, 제작된 공진기 측정에 필요한 Monopole Antenna 구조를 고려하였을 때, 9.2953 GHz에서 동작모드인 $\pi/2$ -mode가 형성됨이 검증되었음.



그림 37. 제작된 X-Band LINAC 가속관 공진기

X-Band LINAC 가속관 공진기는 공학설계를 통해 그림 37와 같이 공진기가 초정밀가공을 통해 제작되었음. 총 24개의 공진기로 구성이 되어 있어, 48개의 공진기 부품이 제작되었고, RF 에너지 인가를 위한 RF Port와 고진공 환경 유지를 위한 Vacuum Port 부품도 제작되었음.

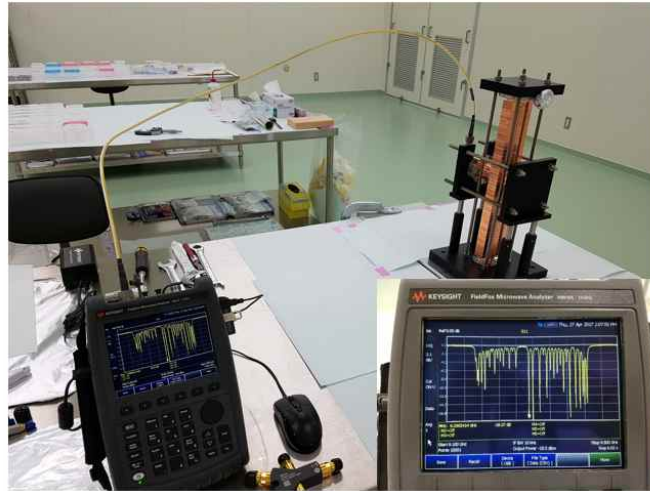


그림 38. LINAC 가속관 RF 특성 측정

Vacuum Brazing 전에 가속관의 RF 특성 평가를 위해 제작된 공진기를 이용하여 그림 36과 같이 가속관을 제작하여 RF 특성인 Reflectance $S_{11}(\text{dB})$ 를 측정하였고, 가속관 동작모드인 $\pi/2$ -mode가 9.290 GHz에서 측정되었음.

나. Vacuum Brazing 공정을 이용한 LINAC 가속관 제작

Vacuum Brazing 접합 공정을 위해 Brazing Filler 물질을 위한 구조를 공진기에 제작을 하였고, 고온의 진공환경에서 Brazing 접합공정을 통해 LINAC 가속관을 제작하였고, Leak 점검을 위한 고진공 실험을 통해 10^{-9} Torr의 고진공 환경이 유지됨이 측정되었음.

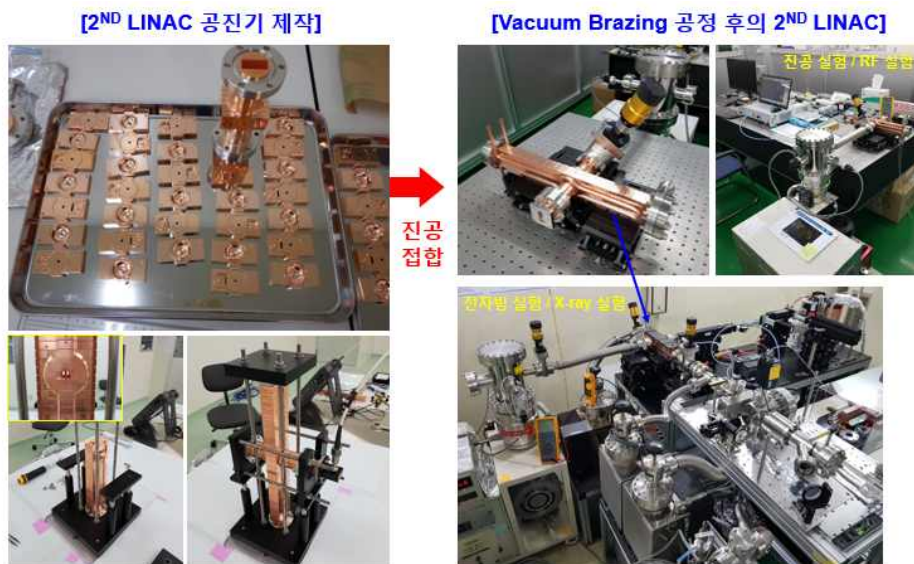


그림 39. Vacuum Brazing 공정을 이용한 LINAC 가속관 제작

3. X-Band LINAC 가속관 RF 특성 분석

MW급 RF 에너지 공급과 고에너지 전자빔이 충돌되는 환경에서 구동되는 LINAC 가속관은 구동되는 온도에 따라 공진주파수 특성이 영향을 받아, LINAC 가속관 온도에 따른 RF Coupler에서의 Reflectance $S_{11}(\text{dB})$ 특성을 측정하였음.



그림 40. 온도에 따른 LINAC 가속관 주파수 특성 측정 Setup

Set Temp (°C) at Chiller	Time	Flow Rate (L/min)	Chiller Temp (°C)	LINAC Temp (°C)	Frequency (GHz)	HFIG Gauge (진공도)	S_{11} (dB)
20	14:47	4.1	19.8	20.9	9.2939	4.1×10^{-8}	-26.59
22	15:01	4.1	21.8	22.5	9.2936	4.1×10^{-8}	-26.31
24	15:13	4.1	23.8	23.9	9.2933	4.1×10^{-8}	-25.97
26	15:31	4.1	25.9	25.5	9.2930	4.1×10^{-8}	-25.44
28	15:45	4.1	27.7	26.7	9.2927	4.1×10^{-8}	-25.11
30	16:00	4.1	29.7	28.0 (Thermocouple Error)	9.2924	4.1×10^{-8}	-24.84
32	16:15	4.1	31.7	29.6 (Thermocouple Error)	9.2921	4.1×10^{-8}	-24.66
34	16:30	4.1	33.7	30.9 (Thermocouple Error)	9.2918	4.1×10^{-8}	-24.25
36	16:47	4.1	35.7	34.9	9.2915	4.2×10^{-8}	-24.06
38	17:02	4.1	37.6	36.8	9.2912	4.2×10^{-8}	-23.64
40	17:17	4.2	39.5	38.3	9.2909	4.2×10^{-8}	-23.60

- Frequency range = 9.1 - 9.5 GHz
 - Frequency resolution = 400 MHz
 - IF bandwidth = 2 kHz

- $\delta F = 3 \text{ MHz}$ @ 총 온도변화 17.4도
 - $\delta F = 172.4 \text{ kHz}$ @ 온도변화 1도

그림 41. 온도에 따른 LINAC 가속관 주파수 특성 결과

그림 40은 온도에 따른 LINAC 가속관 주파수 특성 측정 Setup온도 조절이 가능한 Chiller를 이용하여 LINAC에 접합되어 있는 Cooling Pipe에 온도별 Water를 공급하여 가속관의 온도를 20도에서 40도까지 2도 단위로 조절하고, $S_{11}(\text{dB})$ 의 특성을 VNA (Vector Network Analyzer)를 이용하여 측정하였음.

온도 변화에 따른 LINAC 가속관 주파수 특성 결과를 보면, 온도변화가 17.4도 있을 때, 공진주파수 변화는 3 MHz로서, 이는 1도의 온도변화 조건에서 172.4 kHz의 공진주파수 변화가 있음을 보이고 있음.

제 3절. 1.5 MW급 X-Band 마그네트론 개발

1. X-Band Coaxial Resonator 설계

가. Unstrapped Resonator 설계

X-Band 마그네트론은 LINAC 구동에 필요한 RF 에너지를 발생시키는 전자기파 발생 장치로서, 마그네트론은 전자빔을 발생시키는 음극과 일정한 동작주파수를 갖는 공진회로, 축 방향으로 자기장을 인가하기 위한 자기회로 (Magnetic Circuit), 그리고 공진회로에서 발생된 전자기파를 외부로 방사시키기 위한 안테나 구조를 갖는 출력부로 구성되어 있음.

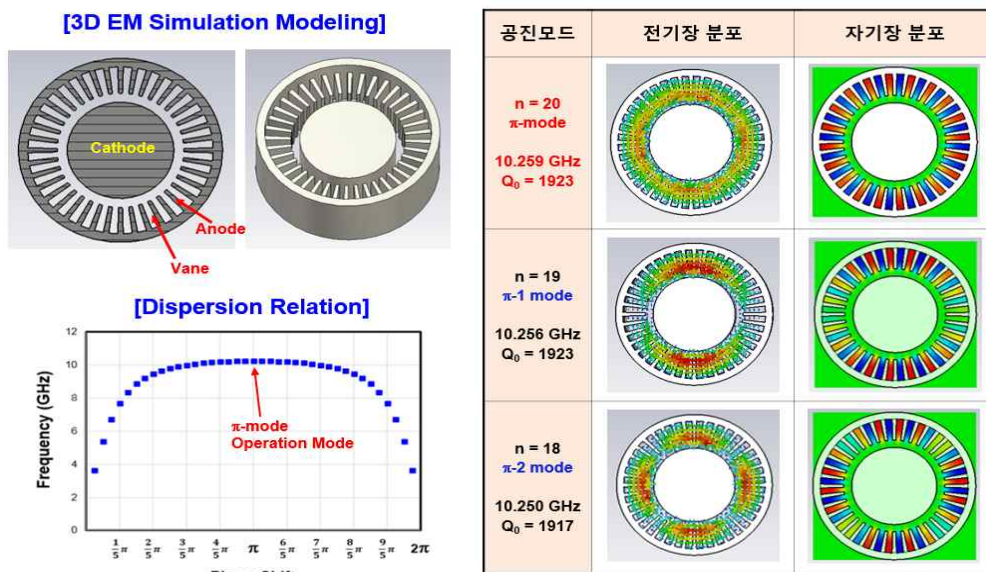


그림 42. Unstrapped Resonator의 시뮬레이션 모델 및 결과

MW급 X-Band 마그네트론의 동작모드 안정화를 위해 공진회로는 Coaxial Resonator 구조를 갖으며, Coaxial Resonator는 중심에 위치하는 Unstrapped Resonator와 Unstrapped Resonator 외부에 위치하는 Coaxial Cavity로 구성되어 있음.

Unstrapped Resonator는 총 40개의 Side Cavity로 구성되어 있으며 동작모드로 사용되는 π -mode는 공진모드 $n = 20$ 에서 X-Band 대역의 공진주파수를 갖는 구조임.

Eigenmode 시뮬레이션을 이용하여 Unstrapped Resonator 공진모드 해석이 수행되었고, $n = 20$ 인 π -mode는 공진주파수는 10.259 GHz, Unloaded Q값은 1923

이고, $n = 19$ 인 π -1 mode의 공진주파수는 10.256 GHz, Unloaded Q값은 1923임. 각 공진모드에 해당하는 공진주파수를 계산하여 Unstrapped Resonator의 특성을 보여주는 위상변화에 따른 주파수의 Dispersion Relation을 계산하였음.

나. Coaxial Cavity 설계

Coaxial Cavity는 Unstrapped Resonator 외부에 위치하고 있으며, Unstrapped Resonator의 Side Cavity에 형성되어 있는 Coupling Slot를 통해 Coaxial Cavity와 Coupling 되어 공진모드를 형성하는 구조로 되어 있음.

X-Band 주파수 대역 Coaxial Cavity는 Anode 높이 = 22 mm와 Radius = 16 mm의 구조를 갖으며, Outer Cavity 높이 = 30.8 mm와 Radius = 41 - 45 mm로 변경해가며 시뮬레이션을 통해 공진주파수 특성을 분석하였고, Outer Cavity의 Radius가 증가할수록 공진모드에서의 주파수는 내려감을 알 수 있음.

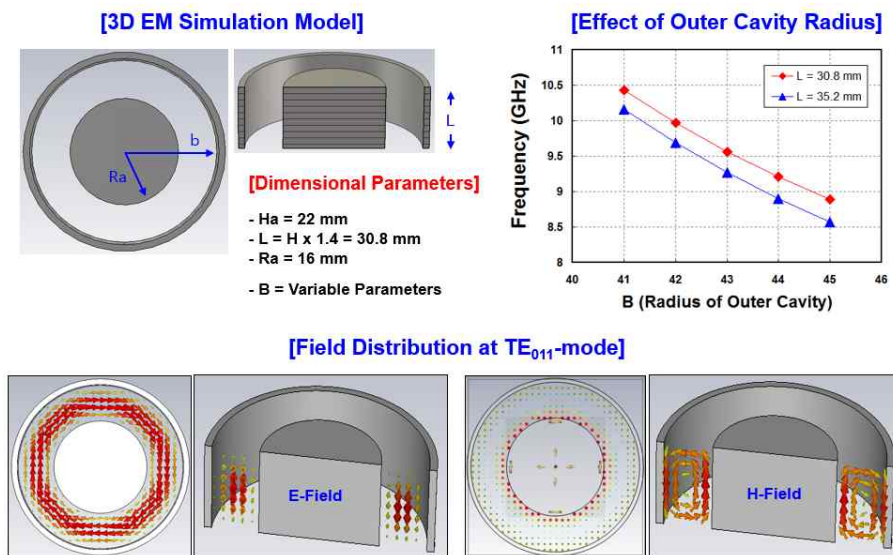


그림 43. Coaxial Cavity의 3차원 시뮬레이션 모델 및 결과

다. Coaxial Resonator 설계

Unstrapped Resonator와 Coaxial cavity를 결합한 3차원 Coaxial Resonator 구조를 모델링하여 공진주파수 특성분석을 위한 시뮬레이션을 수행하였음. Cathode와 Anode의 높이 및 반지름, Outer Cavity의 반지름, Anode와 Vane의 두께는 그림 44와 같은 구조 변수를 갖으며, 시뮬레이션 결과 $n = 20$ 인 동작모드 π -mode에서 8.941 GHz로 나왔고, 이때의 Q값은 1883임.

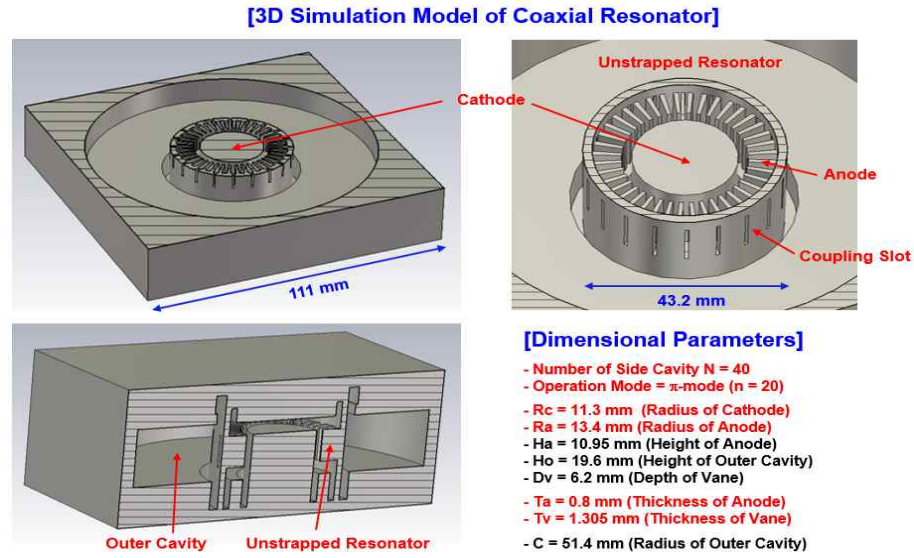


그림 44. X-Band Coaxial Resonator 3차원 시뮬레이션 모델

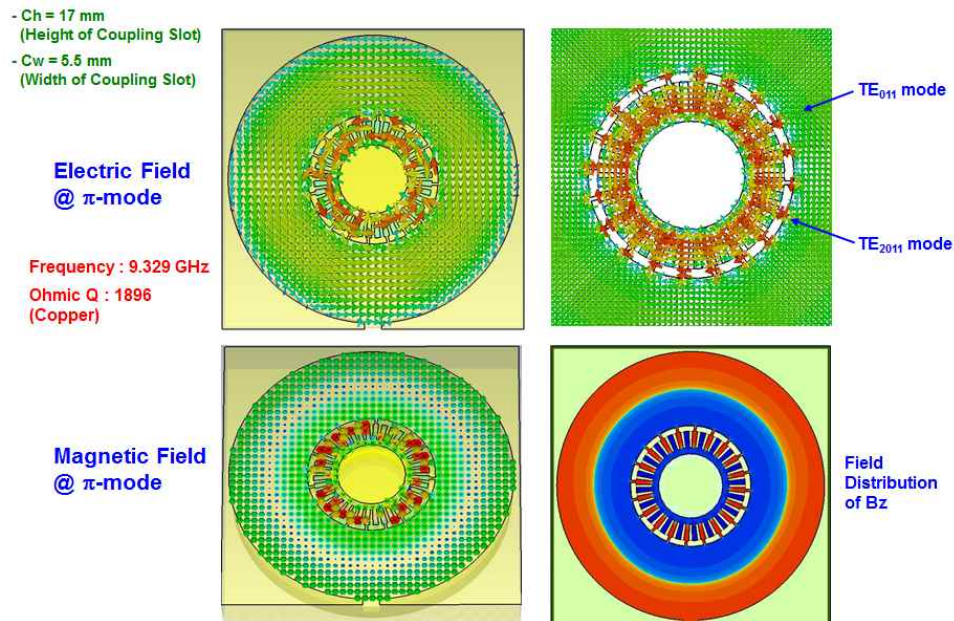


그림 45. X-Band Coaxial Resonator 공진주파수 결과

X-Band Coaxial Resonator의 공진모드와 전자빔의 상호작용으로 발생하는 RF 신호를 외부로 Coupling를 위한 Coupler 구조는 WR-112 도파관 구조와 공진회로 중간에 위치하여 반사손실을 줄이며 공진회로 내부에서 발생하는 RF 신호를 외부로 Coupling 시켜주는데, Coupling 특성분석을 위해 시간영역에서의 S-Parameter 시뮬레이션 분석을 통해, 동작모드인 π -mode는 9.342 GHz에서 형성됨을 전기장 분포 및 자기장 분포를 통해 확인함.

라. Coaxial Resonator의 Tuning 특성 분석

X-Band LINAC System에 연결되어 구동될 마그네트론은 주파수 Tuning 특성이 필요하고, 주파수 Tuning을 위해 Coaxial Cavity 윗면에 위치할 Tuning Plate를 상하 방향으로 물리적인 이동에 의해 Coaxial Cavity의 Volume를 조절할 수 있고, 이를 통해 공진주파수를 조절하여 X-Band 마그네트론의 동작주파수를 Tuning 할 수 있음.

X-Band 마그네트론에서는 Tuning Pin을 +/- 5번 돌리면 주파수가 +/- 25 MHz 조절되는 특성이 요구되는데, 이의 특성을 분석하기 위하여 WR-112 도파관과 Coupler 구조가 포함된 Coaxial Resonator가 그림 46과 같이 3차원 모델링되었음.

Tuning Plate가 기준 위치에서 +/- 188 μm 이동하면, 공진주파수는 9.275 GHz에서 9.325 GHz로 Tuning 되며, 총 주파수 Tuning 범위는 50 MHz를 갖는 특성을 보임.

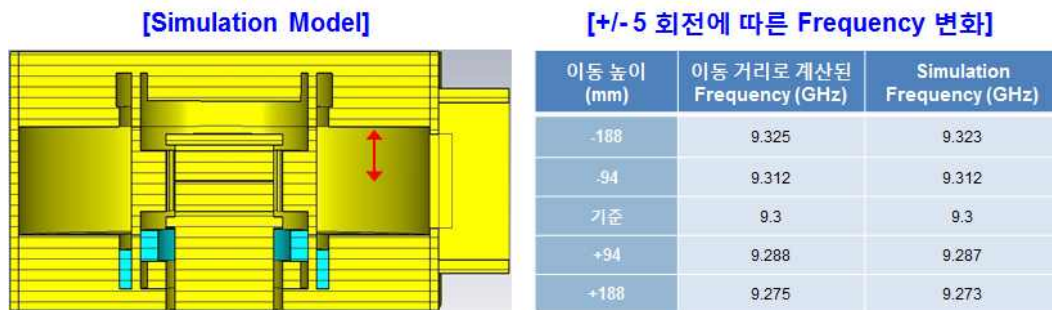


그림 46. Coaxial Resonator의 Tuning 특성

2. X-Band 마그네트론 출력 특성 분석

가. X-Band 마그네트론 PIC 시뮬레이션

설계된 X-Band 마그네트론의 전자파 발생 특성을 측정하기 위하여 3차원 PIC (Particle-In-Cell) 시뮬레이션 모델을 개발하였고, 공진회로 중심에 위치하는 음극 부에서 전자빔이 발생되어, 축 방향으로 인가된 자기장에 의하여 회전운동을 하고 회전운동 하는 전자빔과 공진회로의 공진모드와의 상호작용으로 발생된 전자빔의 특성과 전자파의 특성을 분석하였음.

그림 47과 같이 3차원 전자빔 시뮬레이션에 사용된 구조와 시뮬레이션 구조 변수를 사용하였고, Hexahedral Type으로 나누어 790만개의 Mesh로 형성되었으며, Cathode의 Beam Emission Type은 Explosive로 설정함.

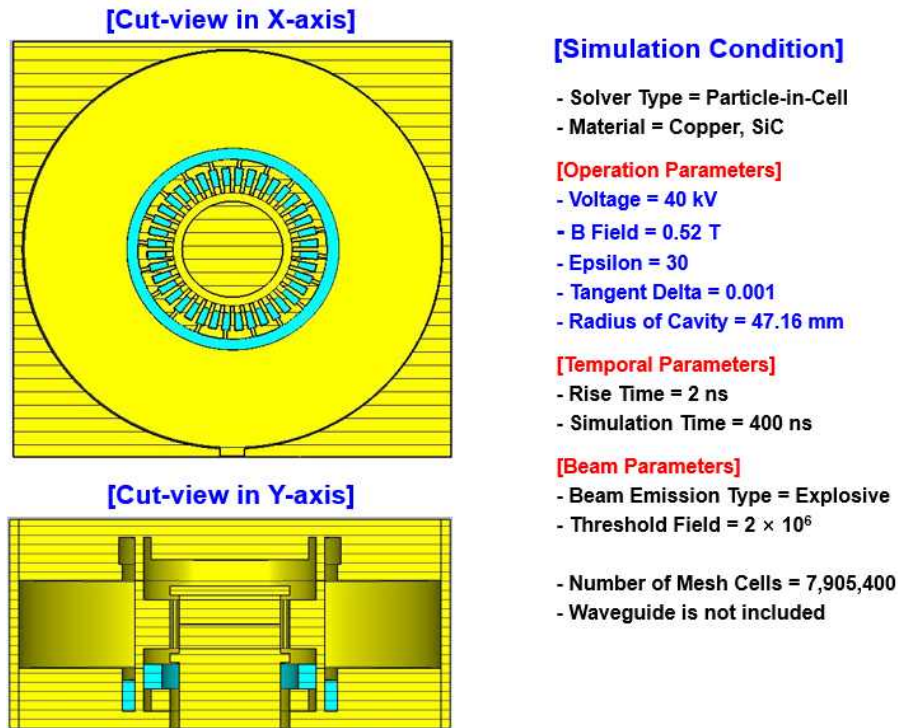


그림 47. X-Band 마그네트론 3차원 PIC 시뮬레이션 모델

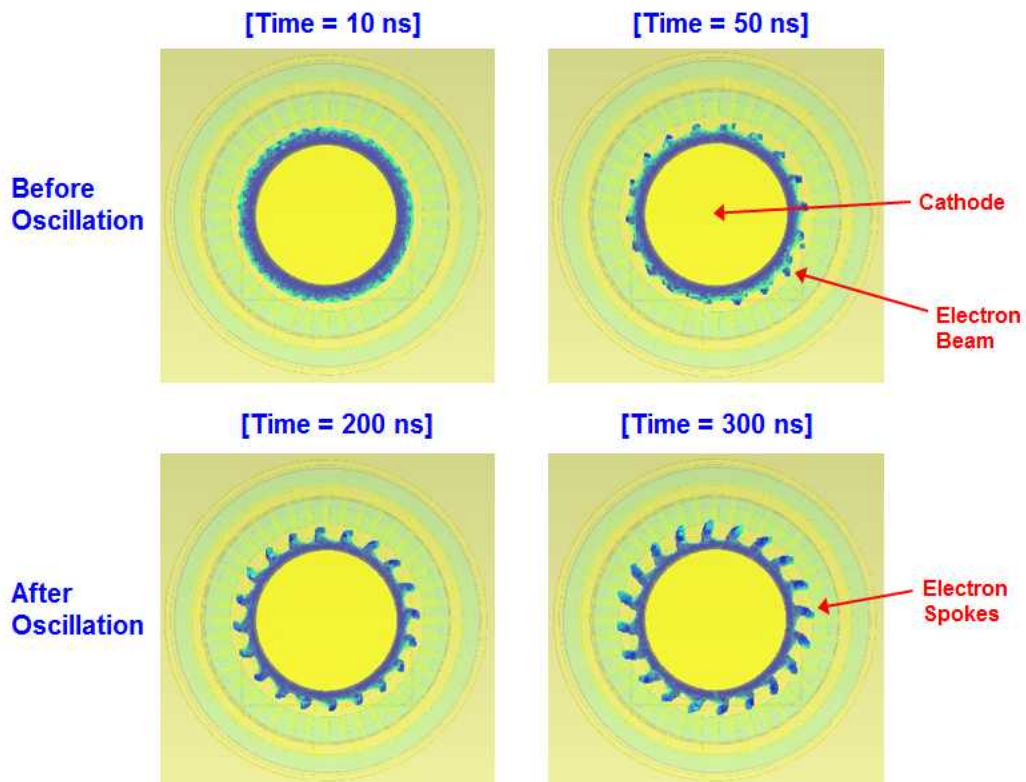


그림 48. X-Band 마그네트론의 시간에 따른 전자빔 분포

그림 48에 보이는 것과 같이, X-Band 마그네트론의 시간에 따른 공진회로에서의 전자빔 분포를 보면, 전자빔이 발생된 초기 10 ns에서는 음극에서 발생된 전자빔이 교차장 (Crossed-Field) 조건에서 회전운동을 하며 공진회로의 공진모드를 발진시키고 있으며, 300 ns의 시간이 되면 전자빔의 공간적 뭉침 (Electron Spokes)이 전자빔과 공진회로 공진모드와의 상호작용으로 형성되어 안정적인 RF 신호를 발생하고 있음.

시간 변화에 따른 3차원 전자빔 시뮬레이션 결과를 보면, Peak Anode Voltage = 40 = kV, Peak Anode Current = 88 A 일 때, 출력부에서의 Peak Output Voltage = 49,000 V가 나오고, Peak Output Power = 1597 kW가 발생되고 있음. 또한, Peak Output Power의 주파수 성분을 보면, π -mode 9.321 GHz에서 동작되고 있으며, 효율은 45.4 %로 측정되었음.

- Electronic Efficiency = 45.4 %

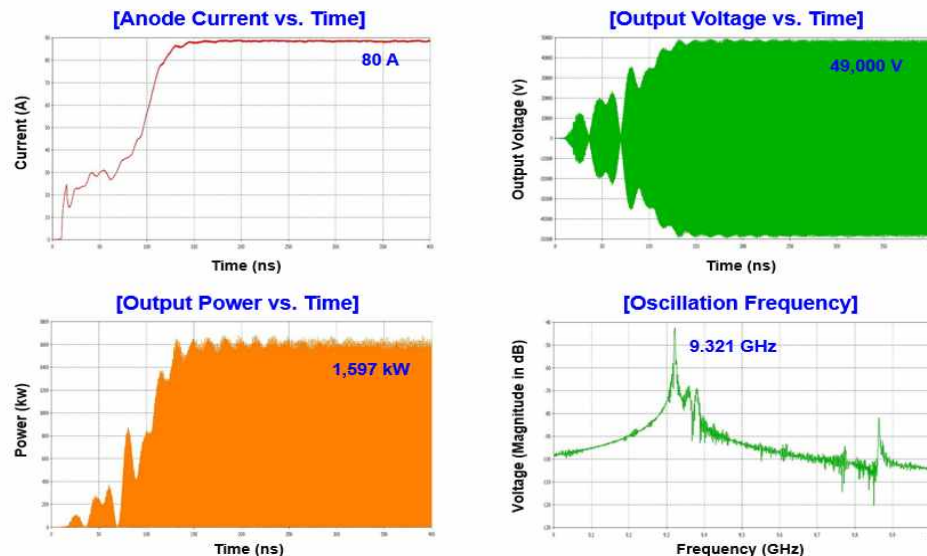


그림 49. X-Band 마그네트론 RF 출력 특성

나. Waveguide 출력부 구조를 포함한 X-Band 마그네트론 PIC 시뮬레이션

Waveguide 출력부 구조를 포함한 X-Band 마그네트론 PIC 시뮬레이션 구조는 Waveguide는 높이 = 28.5 mm, 폭 = 12.62 mm인 WR-112 Waveguide 구조를 갖으며, 도파관과 공진회로가 연결되는 Coupler는 높이 = 17 mm, 폭 = 5.5 mm, 길이 = 8.05 mm의 구조를 갖도록 설계되었음.

3차원 전자빔 시뮬레이션 결과, 출력부에서의 Peak Output Voltage = 37,000 V가 나오고, Peak Output Power = 1694 kW가 측정되며, Peak Output Power의 w 주파수 성분을 보면 π -mode 9.326 GHz 신호가 발생됨.

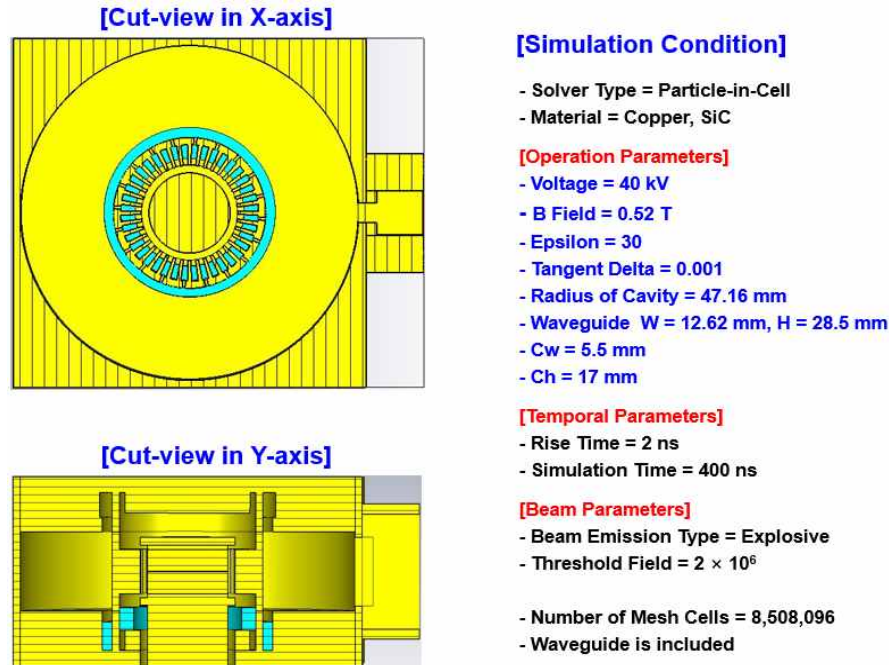


그림 50. 출력부 구조를 포함한 X-Band 마그네트론 3차원 PIC 시뮬레이션 모델

3. X-Band 마그네트론 구성품 개발

가. 공진회로 제작 및 특성 분석

설계된 Waveguide 출력부를 포함한 X-Band Coaxial Resonator의 특성검증을 위하여, 무산소동과 Wire-EDM (Electric Discharge Machining, 방전가공) 공정을 이용하여 그림 51과 같이 제작하였고, VNA를 이용하여 공진주파수 측정을 하였고, 측정된 공진주파수 특성을 보면 9.265 GHz에서 동작모드 π -mode 특성을 갖으며 Unloaded Q = 2967의 값이 측정되었고, 중심주파수 9.3 GHz 대역으로 주파수 Tuning을 통해 조절됨.

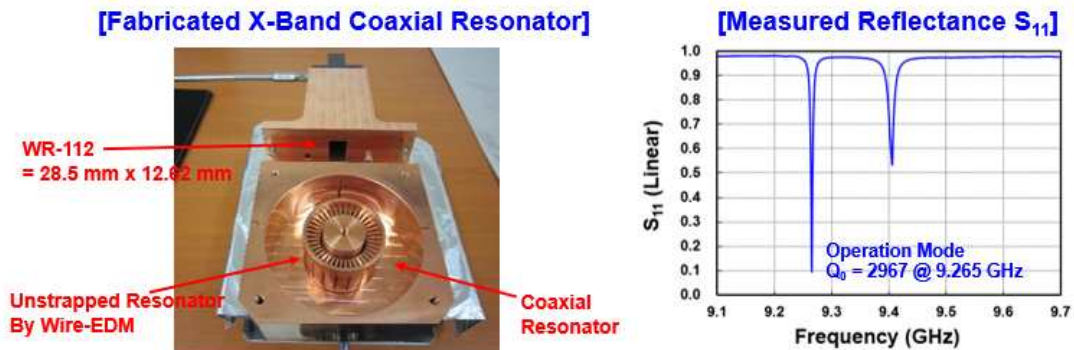


그림 51. X-Band 마그네트론 공진회로 구조 및 Reflectance S_{11} 측정결과

나. X-Band 마그네트론 자기회로 설계

X-Band 마그네트론 구동에 필요한 축 방향 자기장을 인가하기 위한, X-Band 마그네트론 자기회로 (Magnetic Circuit) 구성품은 Aluminum으로 된 Cover Top과 Cover Bottom, ss41에 니켈 코팅된 Polepiece Top과 Polepiece Bottom, Cathode Cap, Magnet Yoke, Inner Tuning Part, Outer Tuning Part로 구성되며, Inner Tuning Part와 Outer Tuning Part는 X-Band 마그네트론의 동작조건에 따른 자기장 가변을 해주기 위한 장치임.

자기회로에 들어가는 영구자석은 공진회로 위와 아래에 각각 1 Set씩 위치하고 있는데, 자기회로의 위쪽에 위치하는 T-Magnet (주파수 Tuner 방향에 위치하는 Magnet 구조)의 구조는 Iron으로 된 T-magnet Plate와 T-magnet Jig, Bar, Sm-Co 영구자석으로 구성되고, 자기회로 구성품의 아래쪽에 위치하는 C-Magnet (Cathode 방향에 위치하는 Magnet 구조)은 Iron으로 된 C-Magnet Jig와 Bar, Sm-Co 영구자석으로 구성됨.

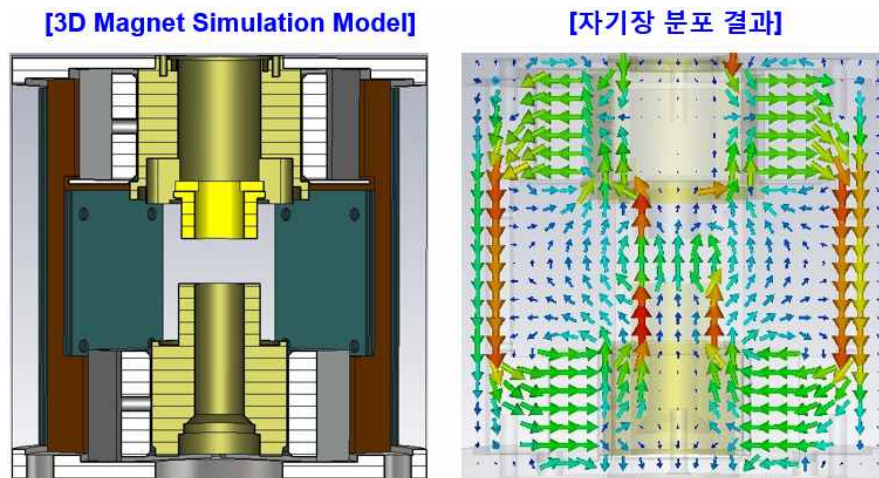


그림 52. 자기회로 시뮬레이션 모델 및 자기장 분포

T-Magnet의 자화방향은 안에서 바깥쪽이고 아래에 있는 C-Magnet의 자화방향은 바깥에서 안쪽으로 설정하였으며, 그림 52와 같이 시뮬레이션 결과 공진회로가 위치하는 중심에서 5000 Gauss 대역의 자기장 분포를 얻음.

X-Band 마그네트론의 동작조건에 따른 자기장 가변을 해주기 위한 장치인 Inner Tuning Part와 Outer Tuning Part의 두께에 따른 자기장 변화 값을 시뮬레이션 상에서 자기회로의 중심을 지나는 위치에서 측정함.

Magnet Yoke 안쪽 면에만 자기장 가변 장치를 부착하여 두께에 따른 자기장 변화 크기를 측정하면, 두께를 1 mm에서 5 mm까지 증가하였을 때 총 61 Gauss

의 자기장이 가변되고, Magnet Yoke 바깥 면에만 자기장 가변 장치를 부착하여 두께에 따른 자기장 변화 크기를 측정하며, 두께를 1 mm에서 5 mm까지 증가하였을 때 총 119 Gauss의 자기장이 가변됨.

Magnet Yoke 안쪽 면에 3 mm 두께의 자기장 가변 장치를 부착한 후, 바깥 면에 자기장 가변 장치를 1 mm에서 5 mm까지 증가시키며 자기장 값을 측정하면, 총 51 Gauss의 자기장이 가변되고, 자기장 가변 장치 없이 자석에서 Magnet Yoke를 1 mm에서 5 mm까지 떨어뜨리면서 Air Gap을 주어 자기장 값을 측정하면, 총 315 Gauss만큼 가변되는 것이 측정됨.

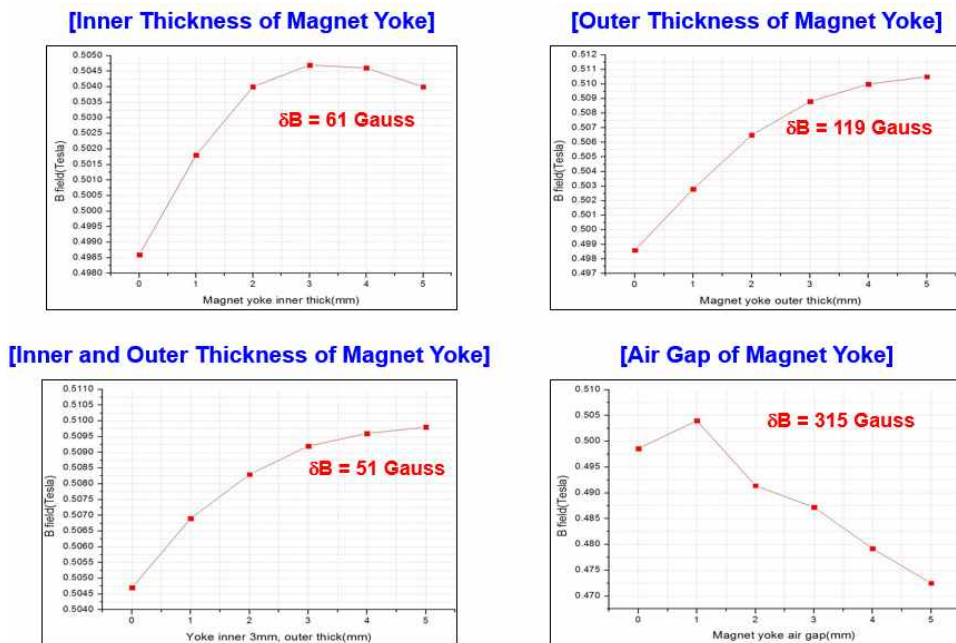


그림 53. 자기회로 구조변수에 따른 중심자기장

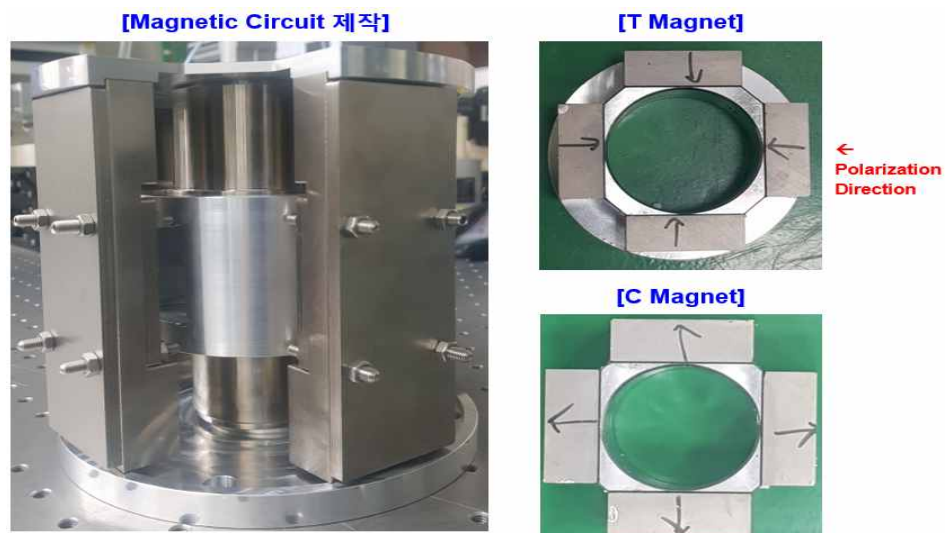


그림 54. 제작된 X-Band 마그네트론 자기회로 구조

다. 음극부 제작

전자빔을 발생시키는 음극부는 Peak 88 A급 전자빔을 발생시키기 위해 Dispen ser Cathode로 구성되어 있으며, Cathode Diameter = 22.2 mm를 갖는 구조로 그림 55와 같이 제작되었고, 0.33 Ω 의 Cold 저항 특성이 있음.

음극에 인가된 전압-전류에 따른 온도결과를 보면, 6.79 V와 9.27 A의 인가 조건 (Input Power = 62.99 W)에서 898도, 7.82 V와 10.10 A의 인가 조건 (Input Power = 79.00 W)에서 950도의 온도특성을 가지고 있어, Peak 88 A급 (전류 밀도 = 17.5 A/cm²) 전자빔을 발생시킴.



그림 55. X-Band 마그네트론 음극 구조

라. RF Vacuum Window 개발

고진공 환경에서 구동되는 마그네트론을 진공 환경을 유지시키면서 발생된 RF 신호를 공기 중으로 전송하기 위하여 필요한 RF Vacuum Window 구조를 그림 56과 같이 3차원 구조를 설계하였고, S-parameter 특성분석을 하였음.

Alumina 기반의 RF Vacuum Window는 WR-112 도파관 구조로 Coupling 되어 있고, Alumina Thickness = 3.45 mm일 경우 9.3 GHz에서 VSWR = 1.02의 저반사 특성을 갖는 구조임.

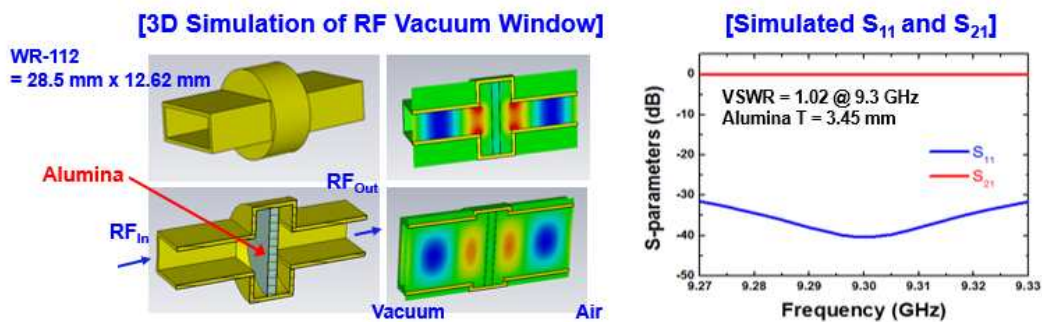


그림 56. RF Vacuum Window 3차원 구조와 시뮬레이션 결과

마. X-Band 마그네트론 공학구조 설계

3차원 시뮬레이션을 이용하여 설계된 공진회로, 자기회로, 음극부 및 출력부 구조를 적용한 X-Band 마그네트론의 3차원 공학구조는 그림 57에 보이고 있음. 공진회로 윗부분에 주파수 Tuning을 위한 Tuning Gear Box가 위치하고, 공진회로 중심부터 아래 영역에 전자빔 발생을 위한 음극부 구조가 위치하고 있음.

공진회로에서 발생된 RF 신호는 Coupler, RF Vacuum을 통해 WR-112 도파관으로 전송되는 구조를 갖으며, MW급 마그네트론 구동을 위해 Water를 이용한 Cooling을 위하여 Cooling Pipe가 공진회로에 연결되는 구조임.

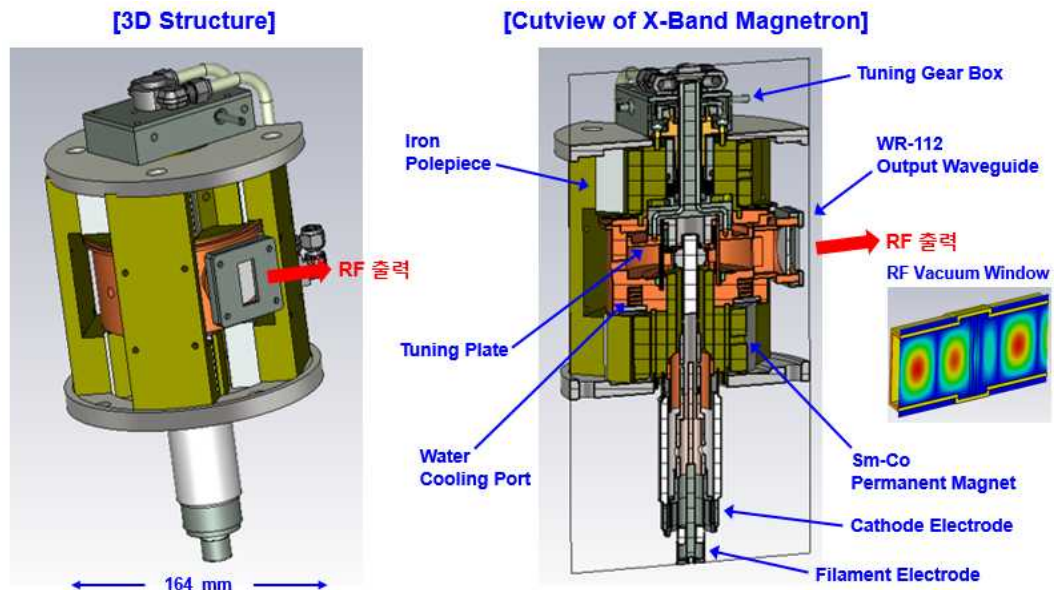


그림 57. X-Band 마그네트론 3차원 공학구조

제 4절. 2.6 MW급 S-Band 마그네트론 개발

1. S-Band Strapped Resonator 설계

가. S-Band 마그네트론 응용분야

고출력 S-Band 마그네트론 기술은 의료뿐만 아니라 산업, 국방 등 광범위한 분야에서 활용되고 있으며 기존 방사선 암치료기 대부분 S-Band (3.0 GHz) LINAC이 사용되고 있음.

특히, 최근 LINAC 구동을 위한 전자기파 에너지 발생장치로 마그네트론 (Magnetron)을 주로 사용되고 있는 추세로 마그네트론은 낮은 동작 전압에서도 구동 가능하면서도 소형 경량으로 암치료기 시스템 내에 직접 설치가 가능한 장점을 가지고 있음.

LINAC 기술은 이외에도 컨테이너 검색기 시스템 (CIS, Container Inspection System), 산업용 X-ray 비파괴 검사 시스템에 활용되고 있으며, 또한 S-Band 마그네트론은 마그네트론을 직접 이용한 기술로는 레이더 분야로 선박, 항공, 공항, 국방 등 다양한 분야에서 널리 사용되고 있으며 그밖에도 열처리, 플라즈마 등 산업 분야에서 널리 활용되고 있음. 그러나 전량 해외 수입에 의존하고 있는 실정으로 국내 개발이 시급한 상황임.



그림 58. S-Band 마그네트론 응용분야

나. Strapped Resonator 기반 S-Band 마그네트론 공진회로 구조

마그네트론의 동작 주파수는 공진 Cavity의 크기 및 Cathode와 Anode 사이의 상호 작용 공간에 의하여 결정되고, 하나의 Cavity는 다른 Cavity와의 상호 작용을 통해 전체 시스템에 여러 개의 공진 주파수가 존재하게 됨. 12-Cavity를 가지는 마그네트론의 경우 $\frac{3}{4}\pi$ 모드, $\frac{1}{2}\pi$ 모드, $\frac{1}{4}\pi$ 모드 등 여러 개의 다양한 진동 모드가 존재하지만, π -mode에서 작동하는 마그네트론이 더 큰 출력 및 출력 안정성을 가짐에 따라 가장 일반적으로 사용되고 있음.

Strapped Resonator 마그네트론에서 Strap 구조를 이용하여 π -mode 주파수와 이외의 주파수를 분리함과 동시에 Strap 구조에 의하여 연결된 Segment를 동일한 Potential을 가지도록 함으로써 출력 및 안정성을 유지할 수 있어 고출력 S-Band 마그네트론은 Strapped Resonator 구조를 적용하고 있음.

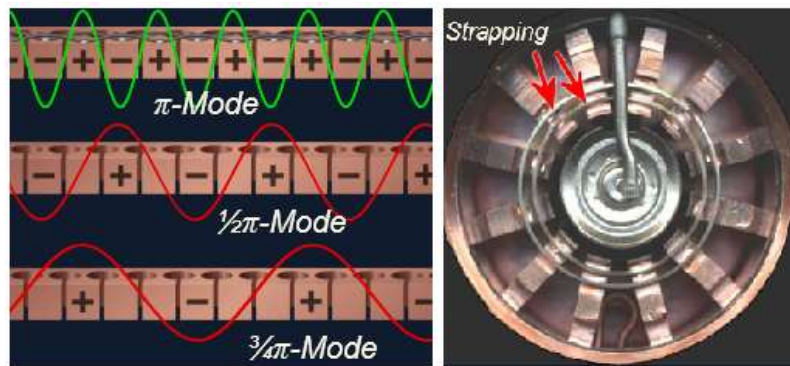


그림 59. Magnetron 공진모드 및 Strapped Resonator 기반 마그네트론 공진회로

다. Dual Frequency Tuner를 적용한 S-Band 마그네트론 공진회로 구조

고출력 S-Band 마그네트론은 크게 공진기 구조를 포함한 Anode와 전자를 공급하기 위한 Cathode, 마그네트론 동작을 위한 전압 입력부, 자기장 형성을 위한 자기회로 (Magnetic Circuit), Output Coupler 및 고출력 RF를 방사시키기 위한 Antenna로 구성된 출력부, 그리고, 마그네트론의 동작 주파수 제어를 위한 Frequency Tuner부로 구분할 수 있음.

기존의 S-Band 마그네트론의 경우 하나의 Frequency Tuner를 이용한 공진기 내부의 Field 변화로부터 약 ± 5 MHz로 가변 할 수 있는 주파수 대역폭 만을 얻을 수 있음.

본 개발에서는 하나의 Frequency Tuner와 대칭으로 Frequency Tuner 구조를 추가하여 가변 할 수 있는 주파수 대역폭을 확장시킴과 동시에 마그네트론 출력 특성이 향상되도록 Frequency Tuner 구조를 개발함.

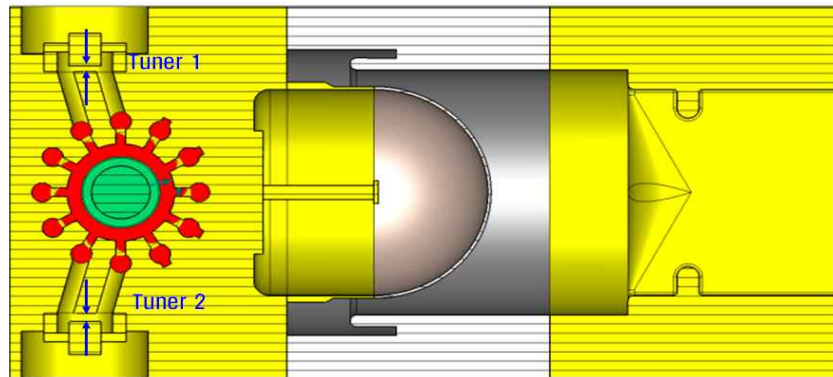


그림 60. Dual Frequency Tuner를 적용한 마그네트론 공진회로 3차원 구조

라. Dual Frequency Tuner를 적용한 S-Band 마그네트론의 공진모드 분석

3차원 시뮬레이션을 이용하여 Dual Frequency Tuner를 적용한 마그네트론에 대한 Eigenmode 시뮬레이션을 수행하였음. 시뮬레이션 결과 2.99298 GHz에서 π -mode가 생성되었으며 근접 mode와도 약 110 MHz 이상의 주파수 차이를 보임을 확인하였음.

시간영역 해석에서는 Strap 구조를 포함할 경우 3 GHz 영역에서는 Resonance Frequency를 가지는 반면 Strap 구조가 없을 경우에는 2.5 GHz 이하, 또는 3.3 GHz 이상의 대역에서 공진 주파수가 존재함.

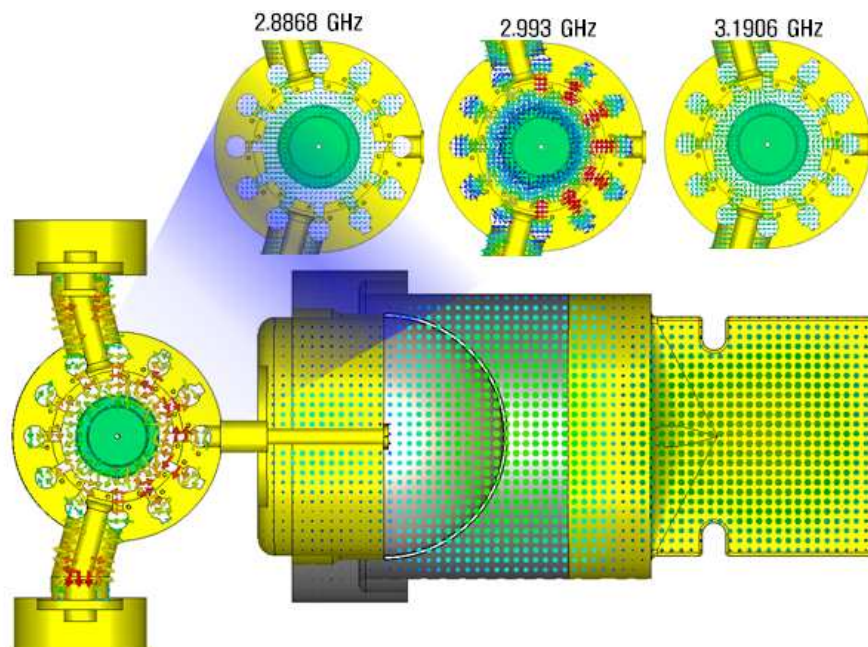


그림 61. Dual Frequency Tuner를 적용한 마그네트론 공진회로의 공진모드에서의 Field 분포

특히, Strapped 마그네트론에서는 Strap Wire의 굵기와 길이 변화에 따라 공진 주파수가 민감하게 이동하여, 설계 시 Strap Wire의 굵기는 무산소동 Wire 제작이 가능한 $\varnothing 1.3$ mm로 지정하여 설계하였으며 Wire 길이는 약 21 mm로 하였음. 또한, 실제 제작된 구조의 비교를 위하여 Strap Wire의 Bending 구조를 반영하여 시뮬레이션을 진행하였음.

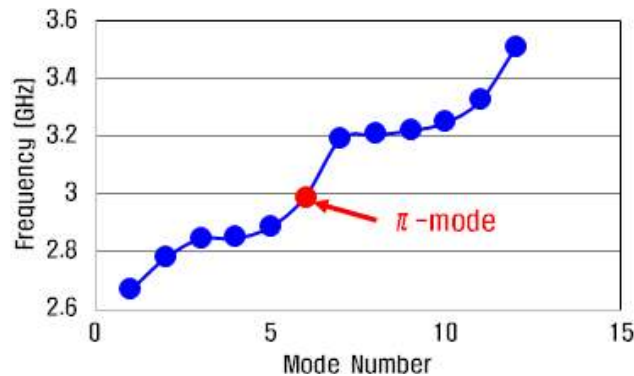


그림 62. S-Band 마그네트론 공진회로의 Dispersion Relation

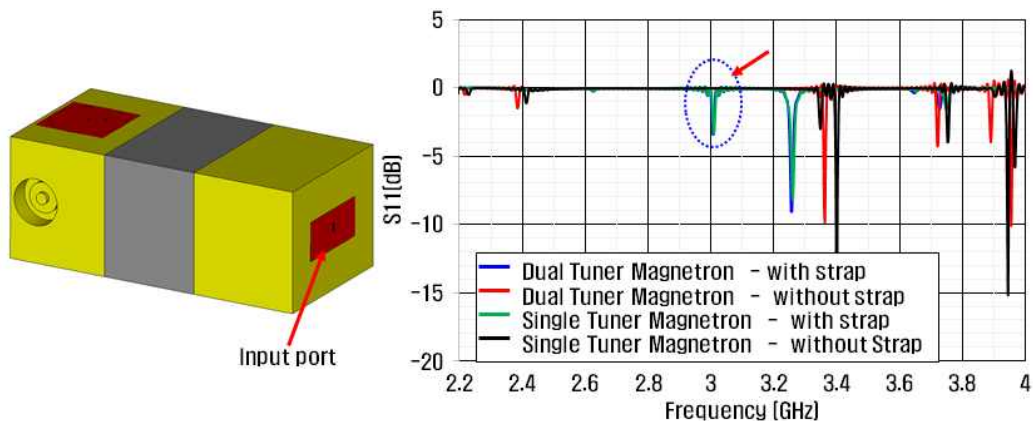


그림 63. S-Band 마그네트론 공진회로의 Reflectance S_{11} 특성

2. S-Band 마그네트론 출력 특성 분석

가. S-Band 마그네트론 동작 조건

그림 64는 Anode의 반경 = 9 mm, Cathode 반경 7.6 = mm 마그네트론에 대한 자기장 및 동작 전압 조건으로 계산된 동작조건 결과로서, 약 1550 Gauss, 45 kV 에서 동작조건 (Operation Condition)을 가짐.

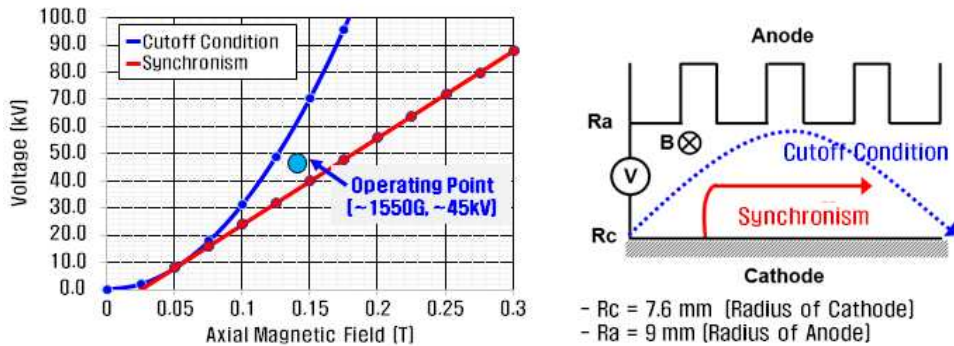


그림 64. Calculate Operation Condition

나. Dual Frequency Tuner S-Band 마그네트론 PIC 시뮬레이션

3차원 전자빔 PIC (Particle-In-Cell) 시뮬레이션을 통하여 마그네트론 출력 및 동작 주파수 특성을 확인하였고, 특히 시뮬레이션 시간 및 정확도를 개선하기 위해 마그네트론 구조를 단순화시켜 사용하였음.

Anode와 Cathode 사이에 Discrete Port를 이용하여 전압을 인가시키도록 하였으며 Output power는 Waveguide 내에 Field Monitor를 설치하여 계산하였음.

그림 65는 시간에 따른 마그네트론 내의 Electron Particle 분포로 12개의 Cavity 구조에 대하여 일정 시간 경과 후 6개의 Electron Spoke가 안정적으로 형성을 확인하였고, 그림 66는 46 kV, 0.1525 T 하에서 Tuner 1과 Tuner 2의 Gap 이 모두 2mm일 경우 PIC 시뮬레이션 결과로 출력은 2.73 MW, 전류는 약 150 A, 주파수는 2.999 GHz로 발진됨을 확인함.

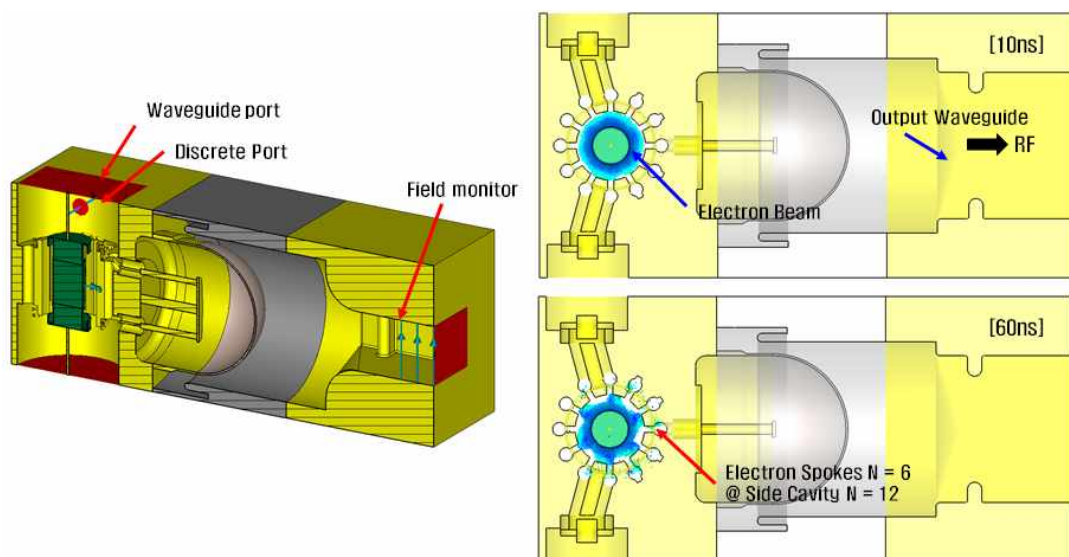


그림 65. Dual Frequency Tuner S-Band 마그네트론 PIC 시뮬레이션 전자빔 분포

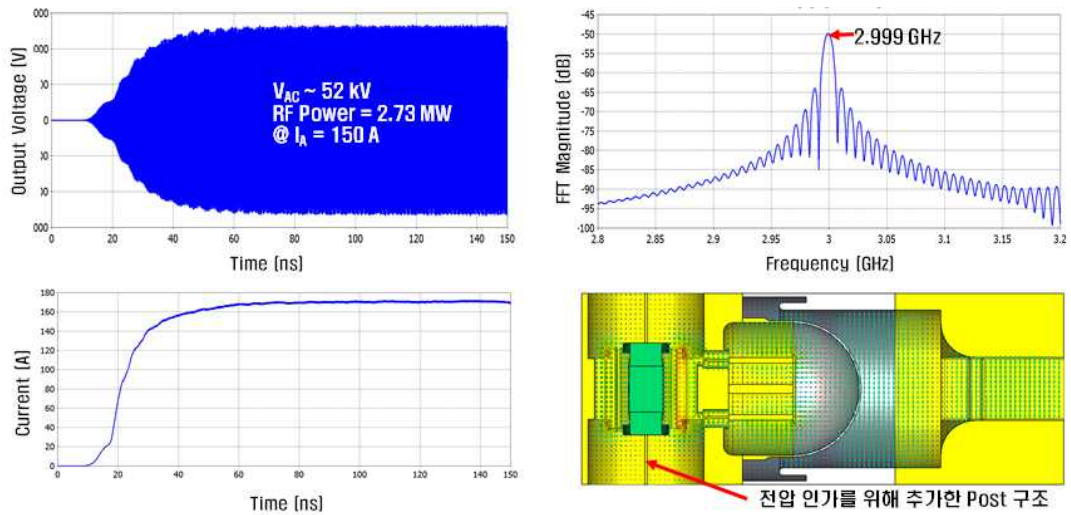


그림 66. PIC 시뮬레이션 결과 (46 kV, 0.1525 T, Tuner 1 = 2mm, Tuner 2 = 2mm)

다. Tuning 조건에 따른 마그네트론의 발진 주파수 및 출력 특성

Dual Frequency Tuner 구조에서 각 Tuner의 Gap 거리를 조절하여 주파수 및 출력 제어가 가능함. 단일 Tuner 구조에서의 Gap 거리를 0에서 4 mm로 조절할 경우 약 5.5 MHz의 주파수 가변이 가능한 반면 Dual Frequency Tuner 구조에서는 8 MHz까지 가변이 가능할 뿐만 아니라 Tuner부의 Gap을 각각 조절한 출력 제어가 가능함.

특히 Tuner 1의 Gap을 4 mm로 고정할 경우 Single 구조와 유사한 주파수 특성을 가지면서도 5% 이상 출력이 개선된 결과를 보였음.

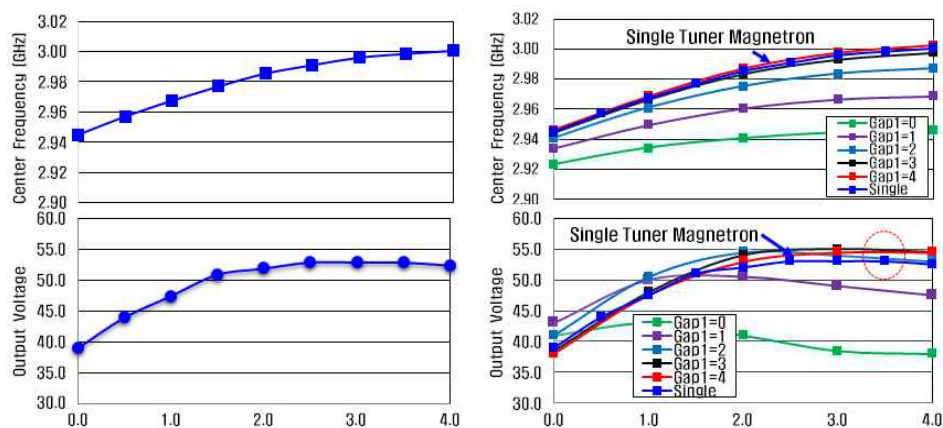


그림 67. Dual Frequency Tuner 구조에서 Gap 거리에 따른 주파수 및 출력 변화

3. S-Band 마그네트론 구성품 개발

가. 음극부 개발

고출력 S-Band 마그네트론은 낮은 Work Function을 가지고 있는 Dispenser Cathode를 적용하여 사용하고 있고, 특히, Dispenser Cathode는 낮은 온도에서도 동작이 가능함 (동작 범위 : 800 - 1250 ℃).

최근에는 바륨 옥사이드 (BaO)가 균일하게 분산된 다공성 매트릭스 구조의 Tungsten Dispenser Cathode가 가장 널리 사용되고 있음. 본 개발에서는 상용 마그네트론에서 사용되는 Cathode 외형 구조에 기초하여 Tungsten Dispenser Cathode 구조를 설계 및 제작하였음.

마그네트론 Cathode는 Anode 구조의 중심에 위치되어 사용됨에 따라 Cathode에 고전압 고전류의 전원 입력 및 Cathode 동작 시 발생하는 열에 의한 변형이 없는 Support 구조 필요하여, 대부분 낮은 전기 저항과 높은 강도 및 열 변형이 거의 없는 몰리브덴 (Molybdenum)을 사용하고 있음.

특히, 몰리브덴 재료는 자기장에 의한 영향이 없어 마그네트론 인가되는 자기장 필드에 변화를 주지 않는 재료이고, 본 개발에서는 기존의 고정형 Cathode 구조에서 Cathode를 교체 가능하도록 구조를 설계하였음. 또한, 열 해석 시뮬레이션을 이용하여 Power에 따른 Cathode에서의 열 변화 및 Flow rate에 따른 온도 안정성을 계산함.

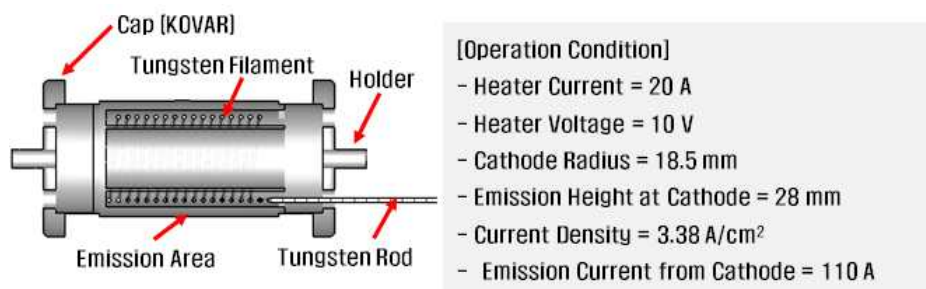


그림 68. Dispenser Cathode 설계 구조 및 Operation Condition



그림 69. Cathode Support 설계 구조 및 제작 부품

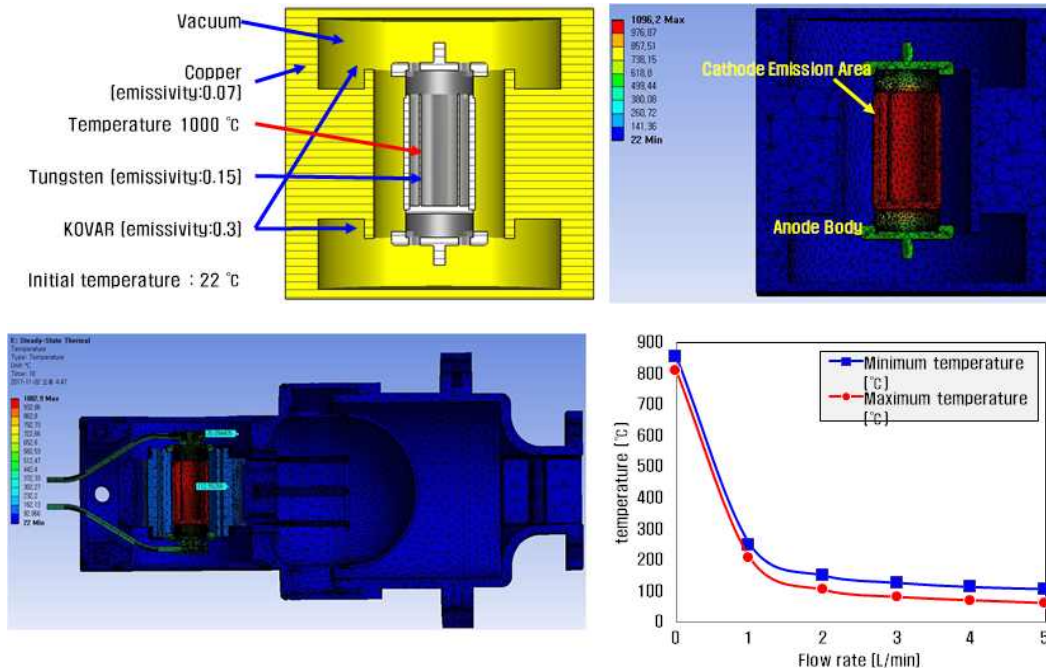


그림 70. 열 해석 시뮬레이션을 이용한 S-Band 마그네트론 열 해석 결과

Pyrometer 검출기를 이용하여 제작된 Cathode 구조에 대하여 Heater Power에 따른 Cathode 열 변화 특성을 측정하였고, 측정 결과 Heater Power에 따라 선형적으로 온도가 증가하고, Heater 전류 = 11 A, Heater 전압 = 8.4 V의 924. W의 입력 Power 인가 조건에서 Cathode 표면에서의 최대 온도가 850°C로 측정되었고, 측정 온도에 대한 측정오차를 줄이기 위해 진공 챔버 Viewport의 Glass 특성에 따른 온도 보정이 필요함.

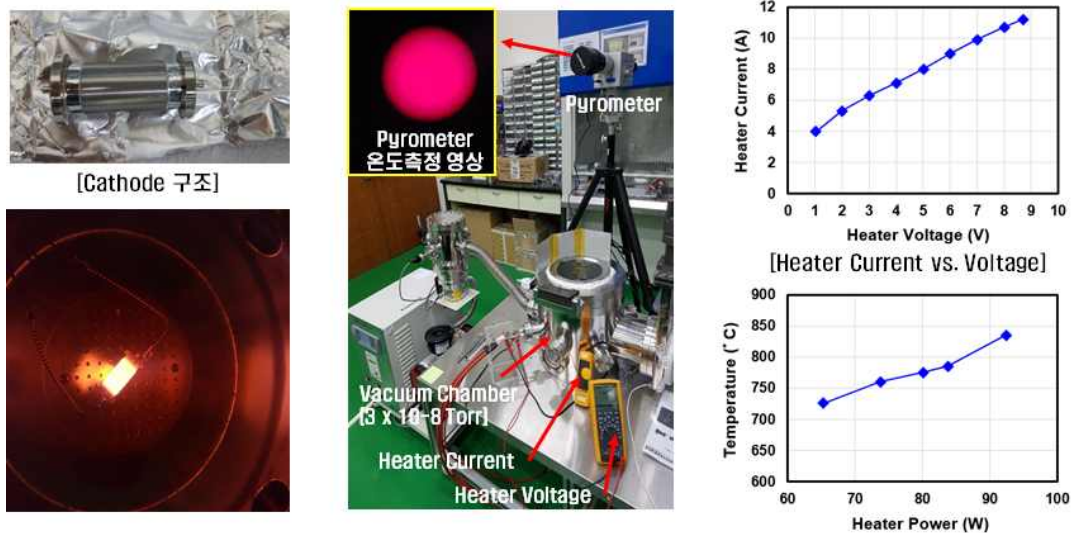


그림 71. Heater Power에 따른 Cathode 온도 측정 결과

나. 자기회로 (Magnetic Circuit) 및 자기장 3D 측정시스템 개발

국내 제작 시 재료 변경에 따른 특성을 반영을 위하여 순철 재료에 대한 파라미터를 보정하여 1 % 오차를 가지도록 시뮬레이션 보정하여 설계하였고, 자기회로의 3차원 자기장 분포 측정을 위하여 Linear Motor를 이용한 자기장 측정 시스템을 개발하였음.

측정 시간을 줄이기 위해 Gauss Meter에서 측정된 값을 Analog 신호로 변환 후 DAQ 보드를 이용하여 실시간으로 측정하는 방식으로 시스템을 제작하였으며 LabVIEW 기반의 통합 제어 시스템 및 측정된 자기장을 실시간으로 보여주는 영상 재구성 프로그램을 동시에 개발함.

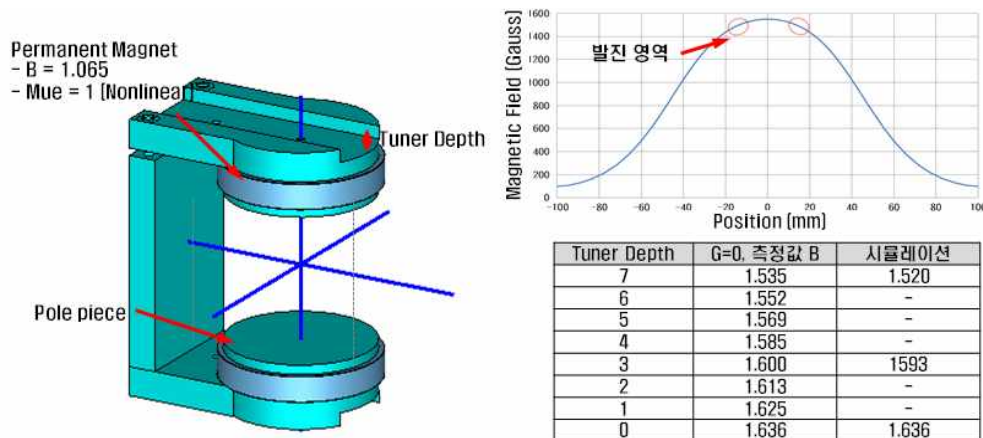


그림 72. 자기회로 시뮬레이션 결과 및 측정값

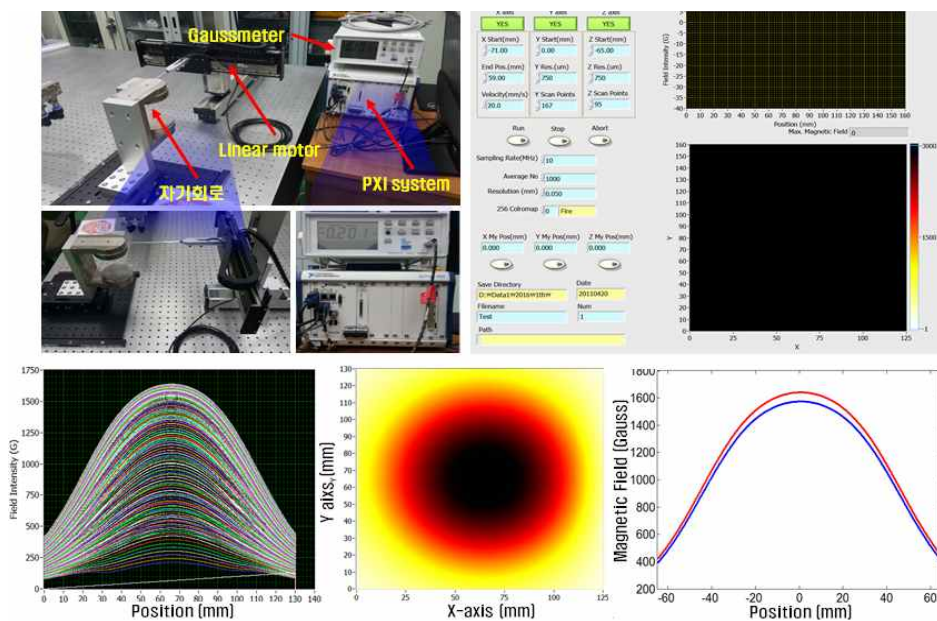


그림 73. 3차원 자기장 분포 측정시스템 및 자기회로 측정 결과

다. Circular-Waveguide Mode Transition 구조 개발

Circular Waveguide Mode Transition 구조는 Transition 구간에서의 Power Loss 및 반사가 최소화되도록 설계되었고, 설계된 Circular Waveguide Mode Transition 구조는 3.002 GHz에서 0.005 dB의 Loss로 사용 주파수 대역에서 거의 손실 없이 전송 가능하고, 국내 제작을 통하여 제작 가능성 검토 및 설계를 확보하였음.

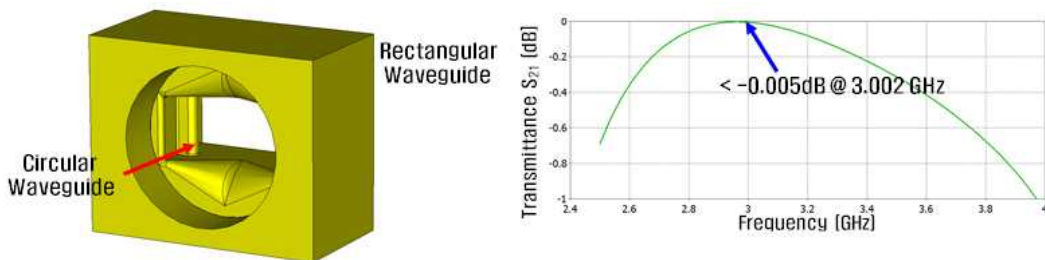


그림 74. Circular Waveguide Mode Transition 시뮬레이션 결과

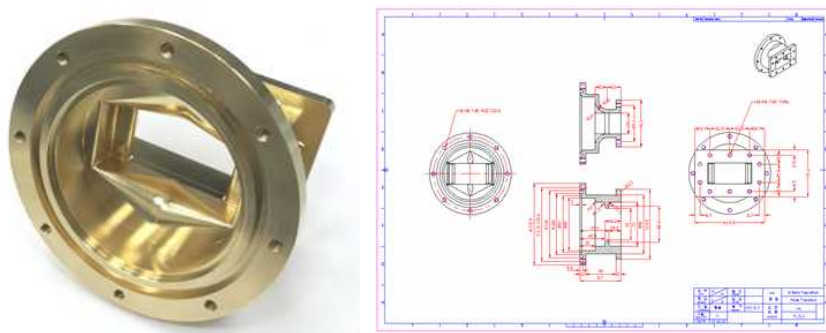


그림 75. 제작한 Circular Waveguide Mode Transition 및 설계도

라. 마그네트론 공학 구조 설계

S-Band 마그네트론 공학 구조는 Single Frequency Tuner 마그네트론에 대한 공학 설계를 기반으로 Dual Frequency Tuner 마그네트론 공학 구조를 설계하는 방식으로 진행하였으며 특히, Dual Frequency Tuner 마그네트론 구조에서는 Tuner부와 자기회로와의 간섭을 최소화하도록 자기회로구조를 수정 보완하였으며 각각의 Tuner는 수동 및 자동 제어 방식으로 교체가 가능하도록 함.

부품 접합 부위를 Cathode를 교체가 가능하도록 하였으며 기존 AFC 제어 Motor인 DC Motor를 Stepping Linear Positioning Motor로 변경함으로써 구조가 간단하면서도 보다 정밀하게 주파수 제어가 가능하도록 하였음.

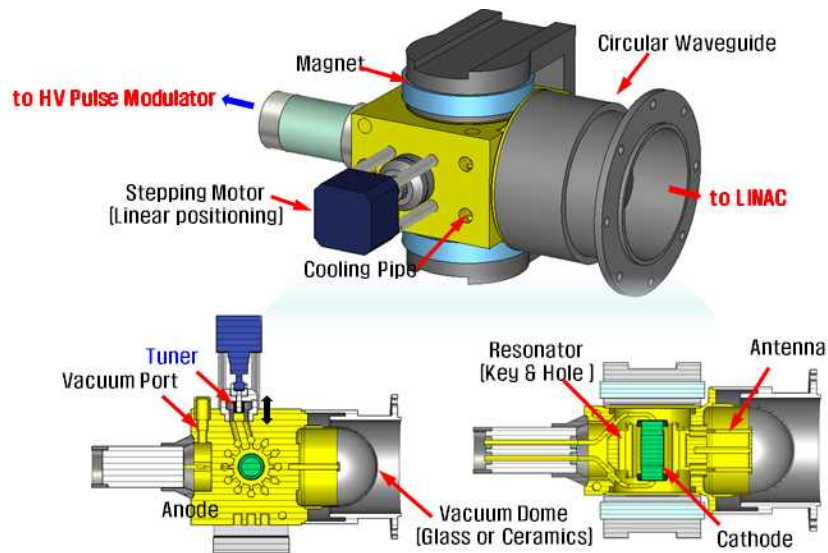


그림 76. Single Frequency Tuner S-Band Magnetron에 대한 공학설계 구조

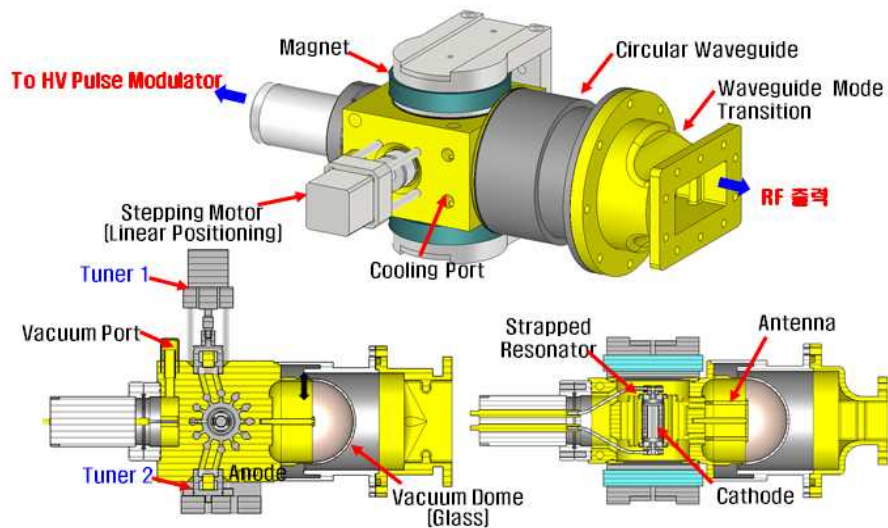


그림 77. Dual Frequency Tuner S-Band Magnetron에 대한 공학설계 구조

마. 마그네트론 부품 제작

국내 고출력 S-Band 마그네트론 회로 가공에 대한 제작 경험이 전무함에 따라 제작 가능성을 검토하고 제작에 따른 오차 및 제작 특성 등을 확인하였음. 국내 가공 시 대부분 가공에서는 크게 문제가 없었으나 가공 시 취급 문제에 따른 불순물 혼입 문제가 발생하여 1차 가공된 Anode Part에 대한 세척을 진행하였으나 세척에 따른 얼룩이 발생하는 2차 문제가 발생. 이를 보완하기 위해 2차 가공 시

에는 청정 설비 내에 설치된 가공장비를 이용하여 가공을 진행하였음. 1차 가공 부품은 조립 후 일부 특성 측정까지 진행하였으며 2차 가공 부품은 제작이 완료된 상태로 향후 추가 측정을 진행할 예정임.



그림 78. 2차 가공된 S-Band 마그네트론 부품

바. S-Band 마그네트론 측정

1차 가공 마그네트론에 대한 VNA를 이용한 공진 주파수 특성을 측정한 결과 Simulation 결과와 거의 3 GHz 근처에서 동일 공진주파수 특성을 가짐을 확인하였고, Dual Frequency Tuner 마그네트론이 가지는 20 MHz 이상의 넓은 주파수 가변 대역폭 측정함.

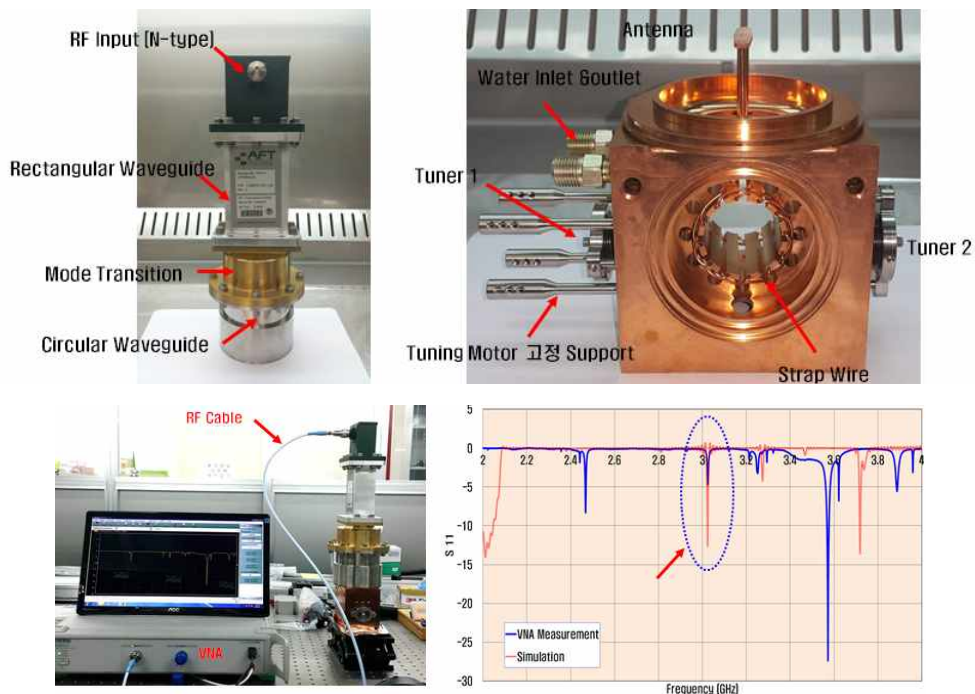


그림 79. 제작된 S-Band 마그네트론에 대한 시뮬레이션 및 VNA 측정값 비교

S-Band 마그네트론 출력 및 동작 주파수 측정을 위한 RF 시스템을 개발하였고, 전체 시스템 사양은 향후 고출력 마그네트론 추가 개발을 고려하여 6 MW까지 측정이 가능하도록 구성하였으며 상용모델을 이용하여 S-Band 주파수 대역 측정 및 2.6 MW급 출력까지 검증 완료함.

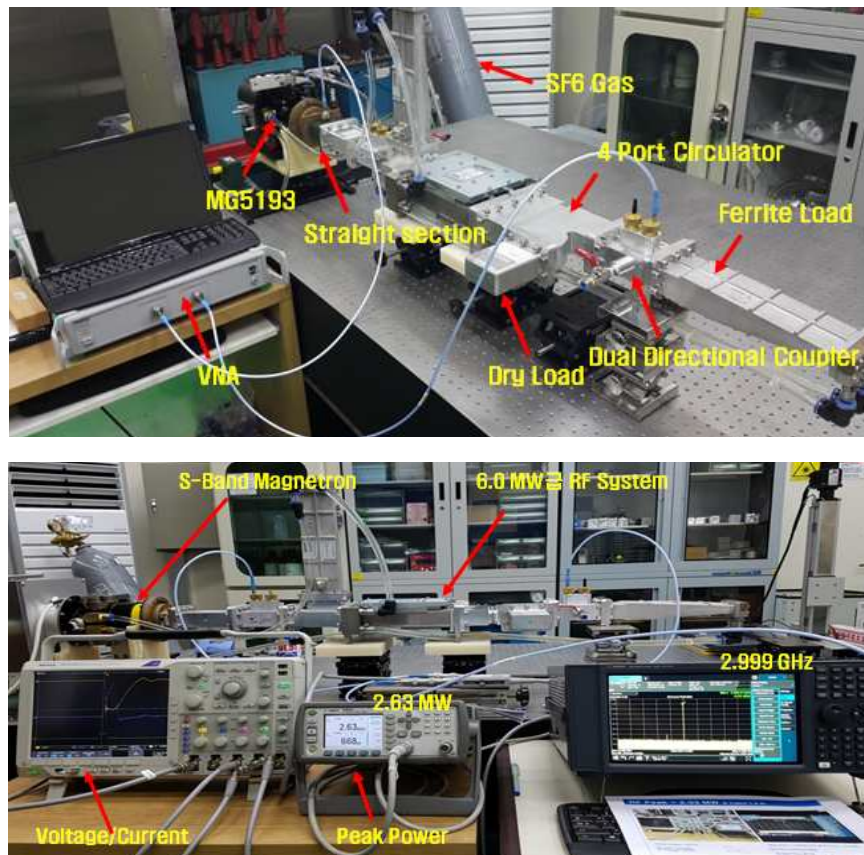


그림 80. S-Band 마그네트론 특성 측정을 위한 측정시스템

제 4장. 목표달성도 및 관련분야에의 기여도

제 1절. 목표 달성도

목표	실적	달성도
6 MeV급 X-Band LINAC 개발	- X-Band LINAC 원격제어 통합구동시스템 개발 - LINAC System 구동 조건에 따른 가속 전자빔 및 X-ray 특성 평가	6 MeV LINAC 개발
Coupling 특성 향상된 X-Band LINAC 가속관 개발	- Coupling 특성 향상된 X-Band LINAC 설계 - X-Band LINAC 가속관 제작 및 RF 특성 평가	가속관 개발
1.5 MW급 X-Band 마그네트론 개발	- 1.5 MW급 X-Band 마그네트론 설계 - 1.5 MW급 X-Band 마그네트론 구성품 개발	설계 및 구성품 개발
2.6 MW급 S-Band 마그네트론 개발	- 2.6 MW급 S-Band 마그네트론 설계 - 2.6 MW급 S-Band 마그네트론 구성품 개발	설계 및 구성품 개발

제 2절. 연구결과의 관련분야에의 기여도

- 본 연구를 통해 개발된 LINAC 기술 및 마그네트론 기술은 의료용 방사선 치료기, X-ray 영상 검사장치, 방사선 기반 산업용 가공장치 등에 활용이 되는 기술임.
- 국외기술에 100% 의존하고 있는 암치료기용 LINAC 기술과 마그네트론 기술을 개발하여 암치료기 핵심기술을 확보하고 고부가가치 첨단 방사선 암치료기 관련 국내 산업 육성 및 국제경쟁력 확보 가능함.

- 소형 경량의 암치료기용 X-Band LINAC 및 마그네트론 기술을 CT 및 MRI 영상유도 방사선 암치료기에 활용함으로써 고정밀 고선량의 방사선을 통한 치료 효과를 극대화할 수 있음. 또한, 치료과정상의 효율성을 증가시킴으로써 방사선 치료로 인한 후유증을 최소화하고 기존 수술 및 회복과정에서 동반되는 사회적 부담을 최소화할 수 있음.
- 암치료기용 마그네트론은 고전압 고전류 조건에서 동작되어 주기적인 교체가 필요한 장치로서, 기술 개발을 통해 고출력 RF 진공소자 관련 기업 육성이 가능함.
- LINAC 기반 응용시스템은 X-ray 비파괴 검사장치와 방사선 기반 산업용 가공 장치에 활용되는 기술로서, X-Band LINAC System 기반의 소형 경량화된 응용 시스템은 기술적 우월성을 가져 국제 경쟁력 확보 가능.
- 마그네트론 기술은 마이크로파 대역부터 테라헤르츠 (THz) 대역까지의 고출력 전자파를 발생시킬 수 있는 기술로서, 생체 친화형 테라헤르츠 암 진단/치료에도 활용될 수 있는 기술임.

제 5장. 연구개발결과의 활용계획

- LINAC 기반 응용시스템인 의료용 방사선 치료기, X-ray 영상 검사장치, 방사선 기반 산업용 가공장치 등과 관련된 업체에 상용화되도록 기술이전 추진.
- LINAC 기반 응용시스템에 활용

1. 의료용 방사선 치료기

- X-ray 기반 방사선 치료기: Tomotherapy, CyberKnife
- 영상유도 기반 방사선 치료기: CT-LINAC, MR-LINAC

2. X-ray 영상 검사장치

- 항만 등에서 활용하는 컨테이너 검사장치 (CIS, Container Inspection System)
- 엔진 등 고가의 산업부품 검사장치- 교량 등 건축물 노후 검사를 위한 이동형 검사장치

3. 방사선 기반 산업용 가공장치

- 공업 분야: 고분자 재료 개발, 나노소재 개발, 내방사선 재료 개발, 전력반도체 제조
- 환경 분야: 오폐수 처리, 대기오염물질 정화, 유기성 폐기물 처리
- 생물자원 분야: 생물 신소재 개발, 노화 조절제 개발
- 식품/생명공학 분야: 식품 가공, 유해물질 제거기술 개발



[LINAC 기반 응용시스템]

제 6장. 참고문헌

- [1] E. A. Knapp, B. C. Knapp, and J. M. Potter, Standing Wave High Energy Linear Accelerator Structures, Rev. Sci. Instr., 39 (1968) 979.
- [2] Rajat Roy and O. Shanker, Calculation of Intercavity Coupling Coefficient for Side Coupled Standing Wave Linear Accelerator, IEEE Trans. MTT, 41 (1993) 1233.
- [3] Y. Kamino, S. Miura, M. Kokubo, I. Yamashita, E. Hirai, M. Hiraoka, et al., Development of an Ultrasmall C-band Linear Accelerator Guide for a Four-dimensional Image-guided Radiotherapy System with a Gimbaled X-ray Head, Med. Phys., 34 (2007) 1797.
- [4] J. St. Aubin, S. Steciw, B.G. Fallone, The Design of a Simulated In-line Side-coupled 6 MV Linear Accelerator Waveguide, Med. Phys., 37 (2010) 466.
- [5] M. Uesaka, T. Natsui, K. Lee, K. Dobashi, T. Yamamoto, T. Fujiwara, et al., 950 keV, 3.95 MeV and 6 MeV X-band Linacs for Nondestructive Evaluation and Medicine, Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip., 657 (2011) 82.
- [6] H. Yang, S.H. Kim, J. Jang, S.J. Park, M.H. Cho, W. Namkung, et al., Design of Compact C-band Standing-wave Accelerating Structure Enhancing RF Phase Focusing, Proc. of IPAC12, (2012) 20.
- [7] J. Shao, Y. Du, H. Zha, J. Shi, Q. Gao, Q. Jin, et al., Development of a C-band 6 MeV Standing-wave Linear Accelerator, Phys. Rev. Spec. Top. Beams. 16 (2013) 90102.
- [8] A. J. Bamford, W. A. Gerard, and C. H. Scullin, A 1-MW L-Band Coaxial Magnetron with Separate Cavity, IEEE Trans. Elec. Devi., 14 (1967) 844.

- [9] W. Daimon and W. Jiang, Modified Configuration of Relativistic Magnetron with Diffraction Output for Efficiency Improvement, Appl. Phys. Lett., 91 (2007) 191503.
- [10] T. P. Fleming, M. Lambrecht, and P. Mardahl, Design and Simulation of a Mega-Watt Class Nonrelativistic Magnetron, IEEE Trans. Plasma Sci., 40 (2012) 1563.

주 의

1. 이 보고서는 국가과학기술연구회에서 시행한 주요사업의 연구보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 국가과학기술연구회에서 시행한 주요사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 아니됩니다.