

KAERI/RR-3370/2010

고출력 테라헤르츠 기술 개발

Development of High-power Terahertz Technology

*KAERI*

한국원자력연구원

# 제 출 문

한국원자력연구원장 귀하

본 보고서를 2010년도 “고출력 테라헤르츠 기술 개발” 과제의 연차보고서로 제출합니다.

2010. 12. 31

과 제 명 : 고출력 테라헤르츠 기술 개발

과제책임자 : 정영욱

참 여 자 : 박성희

이기태

차병헌

박승규

장규하

최화림

김경남

선우정혜

문정호

김하나

장진석

박선정

임정란

KAERI

# 요 약 문

I. 제 목 : 고출력 테라헤르츠 기술 개발

II. 연구개발의 목적 및 필요성

□ 테라헤르츠파, 의료영상 및 보안검색의 차세대 신기술

- “세상을 바꿀 10대 신기술”, 미국 MIT Technology Review지 (2004. 2)
- “일본정부 전략추진 10대 근간기술”중 최우선 과제, 일본 요미우리신문 (2005. 1)
- 화물과 사람이 소지한 폭탄, 무기, 병원체, 마약 등을 정밀검색

□ 실용화의 핵심, 고출력 테라헤르츠 광원 기술 확보

- 기존의 광원기술로는 고출력 테라헤르츠 발생이 어려움
- 가장 이상적인 테라헤르츠 광원, 자유전자레이저<sup>(1)</sup>
- 한국원자력연구원, 테라헤르츠 자유전자레이저 소형화 기술 확보

III. 연구개발의 내용 및 범위

첨단 방사선 기술에 기반한 고출력 탁상형 테라헤르츠 발생장치 및 공항, 항만, 공공시설 등의 보안검색과 의료진단에 안전하게 활용가능한 테라헤르츠 영상 검색장치 개발 및 원천기술 확보

- 소형 가속기 기반 고출력 테라헤르츠 발생장치 개발
- 고출력 테라헤르츠를 이용한 고속 영상 기술 개발
- 탁상형 고속 테라헤르츠 영상 검색장치 개발

IV. 연구개발결과

○ 탁상형 고출력 테라헤르츠 발생장치 설계 및 핵심 요소 기술 개발

- 소형 마이크로트론 가속기 설계 및 고정밀 전자석 제작
- 소형 전자빔 광학계 최적화 설계 및 영구자석 사중극 집속자석 개발

- 가속기 차폐를 위한 방사선 평가 및 차폐체 설계
- 나선형 교번자장기 자기장 구조 설계
- 저손실 테라헤르츠 원형도파관 공진기설계 및 공진기 거울 특성시험
- 고효율 테라헤르츠를 이용한 고속 영상 장치 기반 기술 개발
  - 고효율 테라헤르츠를 이용한 고속 영상 장치 설계 기술 개발



# SUMMARY

I. Project Title : Development of High-power Terahertz Technology

II. Objective and Importance of the Project

□ **Terahertz wave, it is a technology of next generation for medical image and security inspection**

- **“10 new technology that will change the world”**, USA, MIT Technology Review(2004. 2)

- **“10 newest technology propulsed by Japanese government ”** technology with a top priority, Japan Yomiuri Newspaper (2005. 1)

- Complete inspection of bombs, weapons and drugs that are carried by cargo and people.

□ **The core key of commercialization, securing high-power terahertz technology**

- It is hard to generate high-power terahertz using existing light source technology

- The most rational terahertz light source, **Free Electron Laser<sup>(1)</sup>**

- Korea Atomic Resrouce Energy Institute, **secured the technology of miniaturization for terahertz** 자유전자레이저

III. Scope and Contents of Project

**Securing original technology and developing search-device of terahertz image** that can be used safely in the area of port, airport, public facilities, security inspection and medical diagnosis

- Development of high power THz FEL based on compact accelerator

- Development of high-speed THz imaging technology using high power THz wave

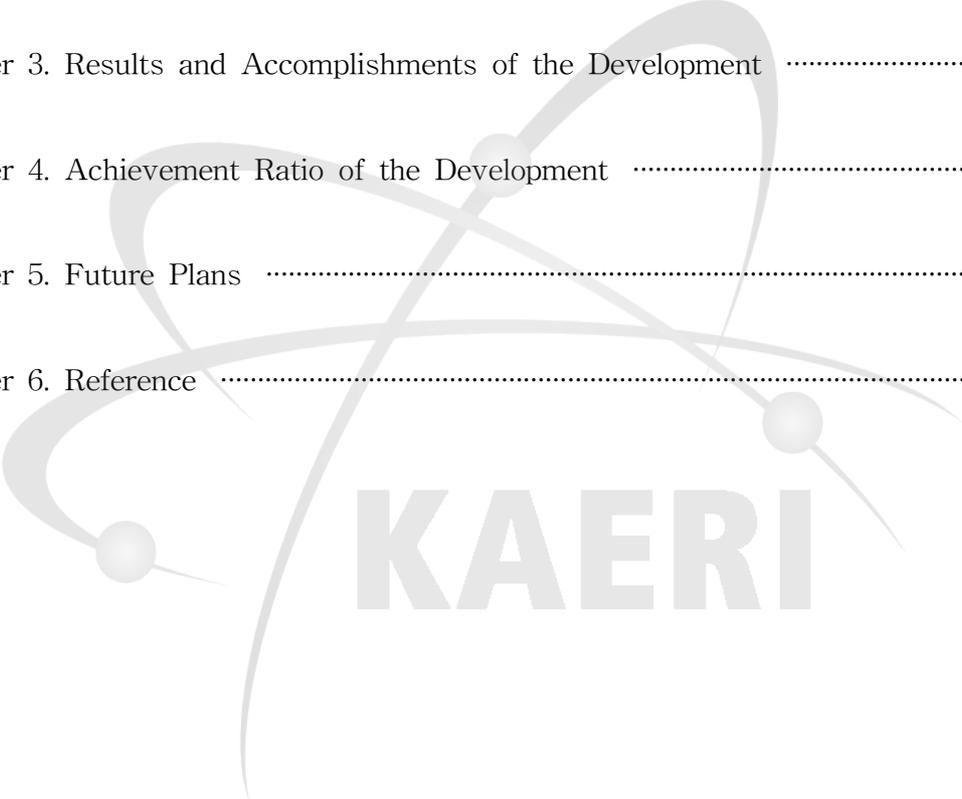
#### IV. Result of Project

- Design of compact high power THz wave source and development of key technologies
  - Design of compact microtron-accelerator and fabrication of high precision electromagnet
  - Optimization of compact electron beam optics desing and development of quadrupole focusing magnet based on permanent magnet
  - Evaluation of radiation dose for radiation shielding and design of shielding block
  - Structural design of helical variable-period undulator
  - Design of low-loss THz wave circular waveguid cavity and test of cavity mirror
- Development of high speed imaging technology using high power THz wave
  - Design of high speed imaging system technology using high power THz wave

KAERI

# CONTENTS

Chapter 1. Introduction .....	1
Chapter 2. Survey of THz Technology .....	6
Section 1. Trend of Technology Development in advanced countries .....	6
1. Trend of Industry market in advanced countries .....	7
2. Domestic Trend of Technology Development .....	8
Chapter 3. Results and Accomplishments of the Development .....	12
Chapter 4. Achievement Ratio of the Development .....	16
Chapter 5. Future Plans .....	18
Chapter 6. Reference .....	19

A large, light gray watermark of the KAERI logo is centered on the page. It features the word "KAERI" in a bold, sans-serif font, with a stylized graphic of three overlapping curved lines and three small circles above it, resembling an atomic or orbital structure.

KAERI

# 목 차

제 1 장 서 론 .....	1
제 2 장 국내외 기술 개발 동향 .....	6
제 1 절 선진국 기술 개발 동향 .....	6
제 2 절 선진국 산업계 동향 .....	7
제 3 절 국내 기술 개발 동향 .....	8
제 3 장 연구개발 수행 내용 및 결과 .....	12
제 4 장 연구개발 목표 달성도 .....	16
제 5 장 연구개발 결과의 활용 계획 .....	18
제 6 장 참고문헌 .....	19



## 표 차 례

표 1. 세계의 주요 테라헤르츠 관련 기업 현황 .....	10
표 2. 테라헤르츠 분야의 향후 시장 전망 .....	11



## 그림 차례

그림 1. 테라헤르츠파(terahertz wave)의 정의 .....	2
그림 2. 테라헤르츠파(terahertz wave)의 영역과 활용성 .....	3
그림 3. 테라헤르츠파(terahertz wave)의 특성 및 응용분야 .....	4



# 제 1 장 서 론

## ○ 다변화되고 점증하는 위협, 테러

- 미 국무부 통계에 의하면 2,000년대 전 세계에서 발생한 테러는 연간 수 백건에 이르는 것으로 나타나고 있음.
- 2001년도 9월 11일에 발생한 항공기를 이용한 테러로 약 3,000여명의 희생자가 발생하였으며, 이후 미국은 'Homeland Security' 정책을 통하여 테러로부터 국가와 자국민을 보호하는 종합적이고 초국가적인 체계를 구축하고 있음.
- 그러나, 미국의 최고 두뇌가 집중된 보스턴에서 발생한 2013년 4월의 보스턴 마라톤 대회 폭탄 테러는 대테러 기술의 어려움을 단적으로 보여주었음.
- 대형 컨테이너, 수화물, 우편물 등을 대상으로 하는 대물용 보안검색은 기존의 엑스선 기술이 효과적으로 적용되고 있음.
- 그러나, 전신검색기 등으로 불리는 **대인용 보안 검색 분야는 근본적인 어려움에 봉착해 있음.**
- 엑스선 전신검색기는 피폭 위험성과 함께, 프라이버시 침해 문제 때문에 현장에서 퇴출되고 있음. 미국은 2013년 5월 말을 기점으로 모든 공항에서 엑스선 전신검색기를 밀리미터파 검색기로 대체하였음.
- 밀리미터파 전신검색기는 해상도가 낮아서 프라이버시 논란은 피할 수 있으나, 검색능력에 대한 근본적인 의문이 지속적으로 제기되고 있음.
- 전 세계적으로 정확하면서도 프라이버시 침해가 없는 새로운 보안 검색 기술에 대한 요구가 절실하게 제기되고 있음.

## ○ 대테러 산업의 급격한 성장

- 911이후 미국의 'Homeland Security' 관련 산업은 2010년 1,800억불 수준의 규모로 급성장하였으며, 개인 보안 산업 규모도 동년 100억불 수준의 규모로 예측되어 보안검색 시장이 미래 핵심 산업으로 빠르게 성장하고 있음. (출처: THz system:: Technology and

Emerging Market, Thintri Inc. 2010)

- 미국의 'Homeland Security' 정책의 강화로 미국과 연결된 전 세계 공항의 보안 수준도 같이 높아질 것이며, 이에 전 세계 보안검색 시장의 급격한 확대가 예상된다.
- 미국, 일본, 유럽, 중국, 러시아 등 선진국과 강대국들은 대규모 시장이 예견되는 보안검색 분야에 대한 국가적인 투자를 강화하고 있으며, 우리도 이에 대한 대처가 매우 시급한 상황임.



그림 1-1. 테라헤르츠파(terahertz wave)의 정의.

○ 분자정보를 읽는 안전하고 부드러운 테라헤르츠파

- 테라헤르츠파는 빛의 대역에서 가장 먼 적외선과 전자파 대역에서 가장 파장이 짧은 밀리미터파 사이에 존재하는 전자기파 대역으로 파장은 30~3,000 μm, 주파수는 0.1~10 THz, 에너지로는 3~300 meV에 해당함.
- 최근까지 테라헤르츠파를 발생하고 측정하는 기술의 어려움 때문에 테라헤르츠파 (THz gap) 으로 명명된 유일한 미개척 전자기파 대역임.
- 우리의 삶과 밀접한 관계가 있는 대부분의 물질은 복합물이나 생체 분자와 같이 복잡한 구조를 가지고 있으며, 이 경우 기존 빛이나 전파로는 미세 구조나 움직임을 분석하는데 어려움이 있음.

- 테라헤르츠파는 이러한 분자들의 정보를 정확하게 읽을 수 있는 최적의 도구임.
- 그리고, 에너지가 낮아서 분자나 원자의 이온화나 구조 변화를 야기하지 않는 안전한 전자기파임.

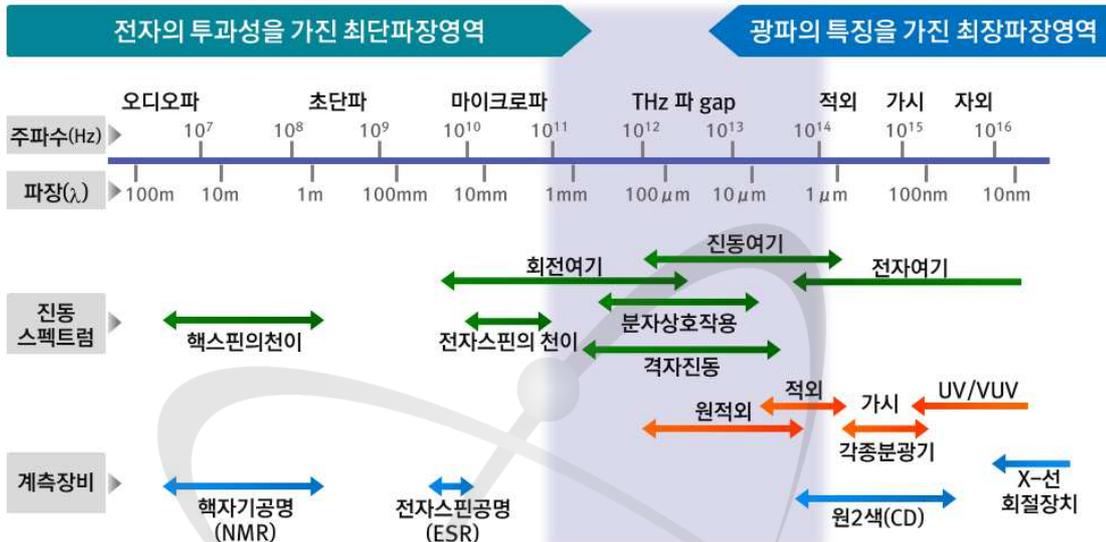


그림 1-2. 테라헤르츠파(terahertz wave)의 영역과 활용성.

- 빛과 전자파가 만나는 경계, **융합의 용광로 테라헤르츠파**
  - 인류는 20세기에 들어서서 레이저, 방사광으로 대변되는 새로운 빛을 가지게 되면서 이전에 접근이 불가능하였던 미시적 세계 등 자연과 인간에 대한 이해의 폭과 깊이가 폭발적으로 늘어났으며, 반도체와 같이 새로운 물성을 활용하는 획기적인 문명의 이기 개발이 가능해졌음.
  - 전자파를 매개로한 무선통신과 IT의 발전으로 인류는 시공간의 제약을 극복하고 정보를 교환하게 되었으며, 사이버 세계가 우리의 일상이 되는 등 인류의 삶은 혁명적인 변화를 겪고 있음.
  - 빛과 전파가 만나는 전자기파 대역이 테라헤르츠파이며, 이제까지는 인류가 접근하기 힘들었던 전자기파 대역의 유일한 불모지였으나
  - 이제는 두 영역이 융합하여 지식기반의 새로운 기술과 시장을 창출하는 용광로로 변화하고 있음.

○ 엑스선을 보완·대체할 차세대 의료 기술

- 국가와 사회의 지속가능성을 확보하기 위해서는 필수적으로 건강한 사회를 추구해야 하며, 의료비 부담을 낮출 수 있는 새로운 조기진단 기술의 개발이 필요함.
- 테라헤르츠파는 안전한 비전리 방사선이면서도 분자레벨의 정보를 정확히 읽는데 최적의 도구임.
- 테라헤르츠파 분자식별 기술을 활용하면 암과 건강한 조직을 확연히 구별할 수 있으며, 더 나아가서 초기 암으로 전이되는 전암 조직도 확인할 수 있음.
- 테라헤르츠파 분광영상을 통하여 병리조직을 직접 촬영하면서 분석하는 기술과 함께 DNA나 단백질의 상태를 정밀 분석하는 라벨프리 바이오칩 (label-free biochip) 기술로도 개발이 가능함. 질병의 초기 미세병변이나 근원을 진단하는 획기적인 조기진단 기술임.
- 궁극적으로 테라헤르츠파를 활용하여 분자 정보를 정밀하게 제어하는 것이 가능해진다면, 새로운 개념의 획기적인 치료법 개발도 가능할 것으로 기대됨.



그림 1-3. 테라헤르츠파(terahertz wave)의 특성 및 응용분야.

○ 국가 안전망을 강화하는 새로운 보안검색 기술

- 테러는 기존의 막강한 전력과 우수한 무기로는 적절히 대응할 수 없음.
- 우리나라도 국민과 국가기반시설을 테러로부터 안전하게 보호하는 새로운 국가 안전망 체계 구축이 시급하게 요구되고 있음.
- 새로운 보안검색 체계는 위험물을 소지한 테러범을 정밀하고 빠르게 식별하는 대인 검색 기술, 원전과 가스/석유와 같은 에너지 저장 시설, 대형 화학시설 등 사고나 테러 발생 시 국가적인 피해가 우려되는 핵심 시설의 이상 징후를 먼 거리에서 정밀 감지하는 원격 검색 기술 등을 포함해야 함.
- 물질의 분자정보를 분석하는 테라헤르츠파는 위험물질의 데이터베이스를 활용하는 자동검색으로 정밀하면서도 프라이버시 침해없는 대인 검색기술 구현이 가능함.
- 핵물질과 독성 가스, 에너지 가스 등 국가적으로 치명적인 영향을 끼칠 수 있는 국가 핵심시설에 대한 사고나 테러에 조기 대처할 수 있는 높은 감도의 원격 검색 기술 개발도 국가 안전망 구축에 중요한 부분이며, 테라헤르츠파는 기체 상태의 분자에 대해서 큰 상호작용 값을 가지고 있어 정밀 분석과 감지에 적합함.

○ 미래 시장에 대비하는 고출력 테라헤르츠파 원천 기술 개발

- 전 세계적으로 미국, 일본, 유럽 등 선진국과 중국, 러시아 등 강대국들은 종합적인 계획을 수립하여 테라헤르츠파 원천기술 선점을 위한 국가 중심의 연구와 투자를 활발히 시행하고 있음.
- 우리도 테라헤르츠파 고부가가치 미래 시장에서 국가 경쟁력을 확보하기 위한 노력을 경주해야 하는 시기이며, 국가 차원에서의 테라헤르츠파 핵심 원천기술에 대한 종합적이고 집중적인 투자 계획을 수립하여 체계적인 연구가 본격적으로 착수되어야 함.
- 이러한 국내외 환경과 필요성을 바탕으로,
- 본 '고출력 테라헤르츠파 기술 개발 사업'은 세계 최고 수준의 고출력 테라헤르츠파 원천기술 개발을 목표로 함.

## 제 2 장 국내외 기술 개발 동향 분석

### 제 1 절 선진국 기술 개발 동향

#### ○ 미국

- '04년부터 에너지성(DOE)과 국립과학재단(NSF), 국립보건원(NIH) 및 전문연구기관 등이 '테라헤르츠 과학기술 네트워크'를 결성하여 의료영상, 안전검색, 항공기 결함검사 등 다양한 분야의 응용기술 개발을 선도하고 있음. 소형 광원에서부터 초대형 방사광가속기, 고출력 테라헤르츠 자유전자레이저를 유기적으로 엮는 협력 체계를 구성하여 활용 중임.
- 국립연구소, 대학 등 약 30개 테라헤르츠 전문연구기관은 기초과학 전반에 대한 연구뿐만 아니라, 자국민에 대한 對테러 안전을 확보하기 위한 보안검색, 폭발물탐지, 지뢰탐지, 불법약물탐지 등에 관한 연구에도 집중하고 있음.
- 대테러에 대한 국가, 사회적인 강한 필요성을 바탕으로 국방예산의 적극적인 지원 하에 관련 기술의 산업화를 활발히 추진하고 있음.

#### ○ 유럽연합

- 유럽의 주요 국가들은 소형 테라헤르츠 기술은 물론이고 거대 테라헤르츠 연구 시설인 고출력 테라헤르츠 자유전자레이저 이용자 시설, 테라헤르츠 방사광가속기 등을 개발하고 이를 첨단 기술 개발에 활용하는 대형 사업에 이르기까지 광범위한 투자와 선도 분야의 연구개발을 집중적으로 수행하고 있음.
- '테라헤르츠 브릿지' 등의 초국가적인 협력체계를 구성하여 공동연구개발을 적극 지원하고 있음.
- 이러한 집중투자와 협력연구의 성과로 (주)Teraview(캠브리지市 첨단 바이오벤처 센타 소재)는 테라헤르츠 관련 상용제품을 개발하여 시장을 주도하고 있음.

#### ○ 일본

- 일본 정부는 향후 10년 동안 중점 추진할 10대 국가 기간 기술 중에서 테라헤르츠 기술을 최우선으로 추진할 것으로 공표하였고 시행 중임.
- 특히, 마약과 폭발물 등을 대상으로 하는 차세대 보안검색 기술의 경제적인 가치를 높이 평가하여 연구 개발에 대한 투자를 급격히 확대하고 있으며, 연간 1,000억원 이상의 막대한 정부예산을 투입하고 있음.
- 일본이화학연구소에서는 국제 우편물에 포함된 마약, 생화학무기, 폭발물 등을 검색할 수 있는 테라헤르츠 검색 장치를 개발하였으며, 이를 현장에 설치하여 시범 운영 중임.

## 제 2 절 선진국 산업계 동향

- 미국, 일본, 유럽 등의 기술 선진국을 중심으로 미래유망기술로만 인식되고 있던 테라헤르츠 기술의 상업화가 아주 빠른 속도로 진행되고 있음.
- 불과 수 년만에 전세계적으로 수 십개의 회사가 테라헤르츠 소재, 부품, 장비를 판매하고 있으며, 앞으로 테라헤르츠 산업 및 시장 규모는 양적·질적으로 급증할 것으로 예상됨. (표 1 참조)
- 2007년부터 향후 10년간 테라헤르츠 시장 규모는 연간 약 28%의 높은 성장을 이룩할 것으로 예상됨.
- 보안검색이나 비파괴 검사기술 등 테라헤르츠 기술로만 접근이 가능한 독점적 기술 분야를 중심으로 국가주도형 연구개발 투자가 활발히 이루어지고 있음.
- 이러한 기술개발의 여파가 향후 의료, 통신, 농업/식품, 환경 분야로 파급되면서 시장의 규모가 점차 확대될 것으로 예상됨. (출처 : "The Terahertz Technologies; R&D, Commercial Implications and Marcket Forecast", Fuji-Keizai U.S.A., Inc., June 2007)
- 현재, 공항에서 승객을 대상으로 폭발물/위험물 소지여부를 검색하는 밀리미터파 검색 장비가 쉬폴(암스텔담), 마드리드(스페인), 제다

(사우디아라비아), 치앙마이(태국), 멕시코시 공항에서 설치되어 시범 운영 중임.

- 영국, 이탈리아, 호주, 러시아, 싱가포르에서도 밀리미터파 검색 장비의 도입을 추진하고 있음.
- 영상에 의존하는 밀리미터파 검색 기술은 프라이버시 침해 등의 문제점이 제기되고 있어서 분광기술로 검색이 가능한 테라헤르츠 대역으로 옮겨갈 것으로 예측됨.
- 미국의 경우만 해도 공항의 수가 14,000여개 임을 감안할 때, 테라헤르츠 검색 기술의 발전은 시장의 양적 팽창에 급격히 기여할 것으로 평가됨.
- 일본정부 보고서에 따르면 약 10년 후 테라헤르츠 시장의 규모는 약 10조원에 이를 것으로 예상하고 있으며, 표 2의 오사카대학 분석 보고서나 기타 유럽연합의 분석에서도 비슷한 경향을 예측하고 있음.

### 제 3 절 국내 기술 개발 동향

#### ① 산업계 동향 :

- 국내에서는 연구소와 대학을 중심으로한 기술 개발이 최근에 이루어지기 시작하였으므로 산업분야의 국내 토대는 이제 막 형성되기 시작하는 단계임.
- 최근까지는, 주로 연구소와 학교에서 수행되는 연구개발을 보조하는 단계이나, 최근, 방사선 비파괴 검사, 의료용 엑스선 영상, 적외선 열영상, 통신 관련 일부 업체에서는 테라헤르츠 기술을 차세대 사업 아이템으로 설정하여 장기 개발 전략을 수립하고 있거나 기초사업을 추진 중임.

#### ② 학계 동향 :

- 서울대, 연세대, 서울시립대, 해양대, 포항공대, 카이스트, 광주과학기술원 등 10여개의 대학에서 테라헤르츠 시간대역분광(TDS, Time-Domain Spectroscopy) 장치를 활용하는 테라헤르츠 분광, 물성, 의과학 기초연구 등을 수행 중임.

- 특히, 파장한계연구센터 (SRC, 서울대), 테라바이오연구센터 (ERC, 서울대) 등 대학 간의 공동연구를 수행하는 연구센터를 중심으로 테라헤르츠 기초 과학 및 바이오 응용에 대한 장기 기반 연구를 수행하고 있으며, 연구계와 산업계에서 요구하는 테라헤르츠 전문 인력을 양성하고 있음.

### ③ 연구계 동향 :

- 한국원자력연구원에서는 1995년부터 고출력 테라헤르츠 발생장치 개발을 시작으로 국내에서는 가장 먼저 연구를 수행하였음. 이후 2000년에 세계 최초로 소형 가속기를 사용하는 고출력 테라헤르츠 자유전자레이저 개발에 성공하는 등 고출력 테라헤르츠 분야에 있어서는 선도적인 역할을 수행하고 있음. 최근에는 주요 병목기술인 탁상형 고출력 테라헤르츠 발생장치 개발에 필요한 설계 기술을 확보하였음.
- 2000년대 중후반부터 전기연, ETRI, 표준연, KIST 등에서 기관의 고유 임무에 부합하는 테라헤르츠 기술 개발을 수행하고 있음.
- ETRI는 약 3년 전부터 테라헤르츠 통신기술 개발을 목표로 테라헤르츠 발생 및 검출 소자, 모듈 등을 개발하고 있으며, 특히, 밀리미터파 대역의 차세대 초고속 통신 기술 확보에 주력하고 있음.
- 한국전기연구원은 약 5년 전부터 펄스 레이저를 사용하는 테라헤르츠 시간대역분광 (TDS) 장치 구축과 테라헤르츠 분광 및 영상 기술 개발을 수행하였음. 이후 진공소자를 이용하는 테라헤르츠 발생장치 개발을 시작하여 현재 밀리미터파 대역의 소형 소자 개발을 수행 중임. 앞으로 테라헤르츠를 이용한 식품 검사 기술 개발을 수행할 계획임.
- 한국표준연구원은 약 2년 전부터 정밀 테라헤르츠 분광 분석이 가능한 AOS-TDS 시스템을 도입하여 구축 중이며, 이를 다양한 물질의 테라헤르츠 분광 데이터베이스 구축에 활용할 계획임. 테라헤르츠 기술의 산업화를 위해서는 표준화 확립이 강력히 요구되고 있는 바, 이를 위한 다양한 기반 기술 개발을 수행할 계획임.
- 그 외, 한국화학연구원, 고등광기술연구소 등에서는 새로운 테라헤르츠 소재와 물질에 관한 기초 연구를 수행중이며, KIST에서는 테라헤르츠 레이저 다이오드 소자인 양자폭포레이저 (QCL, Quantum Cascade Laser)에 관한 기초 선행연구를 수행 중임.

표 2-1. 세계의 주요 테라헤르츠 관련 기업 현황

국가	회사명	주요 제품
일본	Advanced Infrared Spectroscopy Corp.	THz 분광분석 장치
	Tochigi Nikon Corp.	THz 영상장치
프랑스	BFi OPTiLAS	초고주파 및 영상부품
독일	AMO GmbH	고속측정 및 분석모듈
	Bruker Optics	THz 분광분석 장치
	Gigaoptics	THz 분광분석 장치
	MolTech GmbH	THz 재료
미국/독일	Toptica Photonics AG.	THz 발생용 레이저
미국	Vermont Photonics Technologies Corp.	THz 발생광원
	Virginia Diodes Inc.	THz 주파수 조합기
	Calmer Optcom Inc.	THz용 파이버레이저
	Clark MXR Inc.	THz용 극초단 레이저
	Coherent Inc.	THz 발생광원
	IMRA America Inc.	THz용 극초단 레이저
	Lumera Corp.	THz 계측 모듈
	Microtech Instruments Inc.	THz 각종 부품
	NP Photonics	THz용 파이버레이저
	Physical Sciences Inc.	양자폭포레이저
	Picometrix Inc/Advanced Photonics Inc.	THz 분광분석 장치
	RadiaBeam Technologies, LLC	THz 분광분석 장치
	Teraphysics Ltd	진공전자소자(BWO)
	Tera-X	THz 소자
리투아니아	EKSPLA	THz 발생 및 계측기
오스트리아	Femtolasers Produktions GmbH	THz용 극초단 레이저
영국	Fianium	THz용 극초단 레이저
	QMC Instruments	THz 계측 모듈
	TeraView Ltd	THz 영상/분석 장치
	ThruVision Ltd	THz 영상/분석 장치

표 2-2. 테라헤르츠 분야의 향후 시장 전망 (단위 : 억엔)

구 분	엔 화		비 중	
	2010년	2015년	2010년	2015년
정보통신기술 응용	619	3,800	36.5%	52.4%
시큐리티 응용	519	1,583	30.6%	21.8%
바이오.메디컬	58	1,044	3.4%	14.4%
농업.식품응용	388	596	22.9%	8.2%
공업응용	86	192	5.1%	2.6%
환경응용	8	18	0.5%	0.2%
우주계측응용	16	16	0.9%	0.2%
합 계	1,694	7,247	100.0%	100.0%

※ 출처: 테라헤르츠 테크놀로지 시장조사보고서('05년, 일본 오사카대학)



## 제 3 장 연구개발 수행 내용 및 결과

### 제 1 절 사업의 최종 목표

첨단 방사선 기술에 기반한 고출력 탁상형 테라헤르츠 발생장치 및 공항, 항만, 공공시설 등의 보안검색과 의료진단에 안전하게 활용 가능한 테라헤르츠 영상 검색장치 개발 및 원천기술 확보

- 소형 가속기 기반 고출력 테라헤르츠 발생장치 개발
- 고출력 테라헤르츠를 이용한 고속 영상 기술 개발
- 탁상형 고속 테라헤르츠 영상 검색장치 개발

### 제 2 절 연구개발 내용

#### 1. 탁상형 고출력 테라헤르츠 발생장치 설계 및 핵심 요소 기술 개발

- 소형 마이크로트론 가속기 설계 및 고정밀 전자석 제작
  - 5 MeV급 소형 마이크로트론 simulation 및 설계
  - 마이크로트론용 고정밀 전자석 설계 및 제작
- 소형 전자빔 광학계 최적화 설계 및 영구자석 사중극 집속 자석 개발
  - 전자빔 광학계 시뮬레이션 및 최적 교번자장기 (undulator) 입사 조건 확립
  - 영구자석 사중극 집속 자석 설계 및 제작
- 가속기 차폐를 위한 방사선 평가 및 차폐체 설계
- 나선형 교번자장기 (helical undulator) 자기장 구조 설계
  - 나선형 교번자장기 자기장 구조 해석 및 최적화
  - 나선형 교번자장기 초전도 자기장 구조 분석
- 저손실 테라헤르츠 원형도파관 공진기 설계 및 공진기 거울 특성 시험
  - 저손실 테라헤르츠 원형도파관 공진기 설계
  - 공진기 거울 설계 및 반사/투과 특성 조사

## 2 고출력 테라헤르츠를 이용한 고속 영상 장치 기반 기술 개발

### ■ 고출력 테라헤르츠를 이용한 고속 영상 장치 설계 기술 개발

- 테라헤르츠 원격조사장치 개념설계
- 고감도 테라헤르츠 측정기 기술 분석

## 제 3 절 연구개발 결과

### 1. 탁상형 고출력 테라헤르츠 발생장치 설계 및 핵심 요소 기술 개발

#### ■ 소형 마이크로트론 가속기 설계 및 고정밀 전자석 제작

- 5 MeV급 소형 마이크로트론 simulation 및 설계

##### [첨부2 : 핵심성과 스펙검증 세부내역 3, 첨부 1~4]

- 가속에너지: ~ 540~570 keV/turn (가속장 : ~33 MV/m)
- 자기장: 1.0 ~ 1.1 kG, 균일 자기장 영역: 직경 400 mm
- 궤도수 및 궤도 직경: 9 turns, ~ 340 mm
- RF 출력 손실: 평균 110W @ 100 Hz (5  $\mu$ sec)

- 마이크로트론용 고정밀 전자석 설계 및 제작 [첨부 5, 6]

- 크기: 직경  $\phi$ 650 mm x 높이 269 mm, Iron York (S20C)
- Shim: 폭 15 mm x 높이 6.25 mm 내경  $\phi$ 490 mm
- 자기장: 0.9~1.4 kG (전류: 30-50 A), 2x3 코일, 0.01% 정밀도 ( $\phi$ 400 mm 영역)

#### ■ 소형 전자빔 광학계 최적화 설계 및 영구자석 사중극 집속 자석 개발

- 전자빔 광학계 시뮬레이션 및 최적 교번자장기 (undulator) 입사 조건 확립

- 고주파 출력 조건: 560~590 kV, <0.1% jitter, 가속 위상: ~ -14.8 [첨부 7, 8]

- 전자빔 전송 광학계: Type 3:  $0.84 \times 1.11 \text{ m}^2$ , 6개 QM (0.5 ~ 5 T/m), 2개 45 BM (0.5~0.7 kG) [첨부 9~12]

- 영구자석 사중극 집속 자석 설계 및 제작 [첨부 13]

- 자기장 세기의 변화율: 25 T/m, 내경 ~ 5 cm 이상 두께: 20 mm 이하
- 자기장 세기의 조정 영역: 2 - 10 T/m, 내경 ~ 7 cm 이상 두께: 20 mm 이하

- 가속기 차폐를 위한 방사선 평가 및 차폐체 설계 [첨부 14~19]

- ▶ 국부 차폐: 1. 마이크로트론 (가속공동, 인출부) 2. 빔전송계 (45 휨자석) 3. 빔덤프

- 마이크로트론 (가속공동, 인출부) : 방사선량 0.350 mJ
- 45° 휨자석 : 0.6 mJ 전자빔 투과/ 0.12 mJ 감마선 방출. 전자빔 차폐 Al 필요
- 빔덤프 : 3 cm Al/ 납 (진행방향: 20cm, 입구 및 측면: 10cm) : 1.34 mJ (0.08%)
- ▶ 시스템 차폐: 납 10 cm - 1  $\mu$ J, 20 cm - 0  $\mu$ J  $\rightarrow$  10 cm 이하 가능

■ 나선형 교번자장기 (helical undulator) 자기장 구조 설계 및 초전도 자석 기본모듈 시험

- 3-D 자기장 해석 코드를 이용한 나선형 교번자장기 구조 설계
  - ▶ 순철과 영구자석 만을 이용하는 Hybrid PM Undulator에 비해 더 강한 자기장을 구현할 수 있고 자기장의 세기를 조절할 수 있는 초전도 코일로 구동되는 전자석을 이용하는 Hybrid EM Helical Undulator를 구조 설계하였다. **[첨부 20]**
- 나선형 교번자장기 자기장 구조 해석 및 최적화
  - ▶ Undulator 주기 ( $\lambda_u$ )의 길이와 자극 (pole)의 gap크기에 따른 자기장 구조 분석
    - Undulator의 주기  $\lambda_u = 25$  mm, 자극 사이의 gap = 6 mm 일 때 최적의 자기장 구조와 세기를 얻을 수 있었다. 최대자기장의 세기는 7 kG 이다. **[첨부 21~22]**
  - ▶ 초전도 코일에 인가되는 전류의 세기에 따른 최대자기장 세기 분석
    - 초전도 코일에 인가되는 전류의 세기를 0 ~ 2000 A 까지 변화시키면서 시뮬레이션 한 결과, 1850 A 에서 최대 자기장 세기 7 kG 를 얻을 수 있었다. 코일의 전류를 800 ~ 1850 A 까지 변화시키면서 최대자기장 세기를 3 ~ 7 kG 까지 조절할 수 있다. **[첨부 23]**
  - ▶ Undulator 단면에서의 자기장 분포 분석
    - Undulator 단면에서의 자기장 분포를 분석한 결과 자기장의 방향이 도파관 내부에서 축방향으로 진행하면서 회전하는 것을 알 수 있다. **[첨부 24]**
- 나선형 교번자장기 설계 주요 사양
  - ▶ 자기장 세기 : 3~7 kG
- 나선형 교번자장기 초전도 자기장 구조 분석
  - ▶ 전산해석을 통해 설계된 KHU-25 교번자장기와 이론적인 Bifilar 교번자장기에서의 자발방출 스펙트럼을 비교하여 증폭이득 성능이 거의 유사한 것으로 분석됨
    - [첨부 25~26]**
    - 중심파장: KHU-25의 경우 약 5  $\mu$ m 짧음
    - 방출광세기: 차이 0.1% 이내

- ▶ 전자빔이 도파관을 잘 투과하기 위해서는 adiabatic이 중요하며, 전자빔의 반경이 약 1 mm 이하여야 함. [첨부 27~28]
- 저손실 테라헤르츠 원형도파관 공진기 설계 및 공진기 거울 특성 시험
  - 저손실 테라헤르츠 원형도파관 설계
    - ▶ 테라헤르츠파 공진기 모드 왕복 당 손실 : 10% 이하
      - 원형도파관 모드별 손실 계산 [첨부 29]
        - △ 반경 2.4 mm의 금속 도파관: 상온, 1 THz에서 TE<sub>11</sub> mode의 손실이 약 20%
        - 저온에서의 원형 도파관의 손실 계산 [첨부 30]
          - 반경 2.4 mm의 금속 도파관: 액체질소 냉각 시, Anomalous skin effect를 고려하면 1 THz에서 TE<sub>11</sub> mode의 손실이 약 10%
        - Dielectric 물질이 코팅된 원형 도파관에서의 손실 계산 [첨부 31]
          - 반경 2.4 mm의 금속관 안쪽에 유전률 (ε)=1.5, 두께 40μm인 dielectric 물질(Polyethylene)이 코팅된 도파관: HE<sub>11</sub> mode의 손실이 약 2%
    - 공진기 거울 설계 및 반사/투과 특성 조사
      - ▶ 공진기 거울 설계 및 반사/투과 특성 조사 [첨부 32]
        - 두께: 10 μm, 주기: 100 μm, transparency: 0.84 인 정사각형 격자모양의 mesh 에서 반사율이 80% (1 THz)
        - 전자빔에 의해 발생하는 공진기 거울의 열전도 특성 분석 [첨부 33]
          - 최종 도달 온도로 판단할 때 Al이 가장 적합함

재질	Al	Ti	Ni	Cu	Ag	Ta	W
ΔT <sup>H</sup> [°C]	45.6	293.7	175.3	97.8	158.4	534.3	343.7

## 2 고출력 테라헤르츠를 이용한 고속 영상 장치 기반 기술 개발

- 고출력 테라헤르츠를 이용한 고속 영상 장치 설계 기술 개발
  - 테라헤르츠 원격조사장치 개념설계 [첨부 34~37]
    - ▶ 물체의 각 지점에서 산란된 빛의 위상을 임의로 조절하여 스펙클 효과를 줄일 수 있는 영상 장치 설계
  - 고감도 테라헤르츠 측정기 기술 분석
    - ▶ 러시아 부드커핵물리연구소 NOVOFEL을 활용한 마이크로볼로미터 2차원 테라헤르츠 측정기 감도 및 영상측정

## 제 4 장 연구개발 목표 달성도

### 제 1 절 당해연도 성과 달성도

평가지표(핵심성과 스펙)	목표사양(핵심스펙) 달성도	
	2010년 (목표)	2010년 (실적)
3. 고출력 테라헤르츠 기술 개발		
3-1 소형 마이크로트론 가속기 개발	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 소형 가속기 설계</li> <li>- 마이크로트론 마그네트 제작</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 소형 가속기 설계</li> <li>·에너지 : 5 MeV</li> <li>- 마이크로트론 마그네트 제작</li> <li>·자기장 : 1 kG (<math>\pm</math> 0.1%)</li> </ul>
3-2 빔광학계 및 차폐체 개발	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 빔광학계 설계</li> <li>- 차폐 구조 평가 및 설계</li> <li>- 사중극 자석 제작</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 빔광학계 설계</li> <li>·휨자석 및 사중극자석</li> <li>·교번자장기 입사빔직경 : 2 mm 이하</li> <li>- 차폐 구조 평가 및 설계</li> <li>·Geant4 이용 모의실험</li> <li>- 사중극 자석 제작</li> <li>·자기장기울기 : &gt; 10 T/m</li> </ul>
3-3 나선형 교번자장기 개발	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 교번자장기 자기장 구조 설계</li> <li>- 초전도 자기장구조 분석</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 교번자장기 자기장 구조 설계</li> <li>·자기장세기 : 37 kG</li> <li>- 3차원 초전도 자기장구조 및 전자빔궤적/레이저이득 분석 완료</li> </ul>
3-4 저손실 테라헤르츠 원형도파관 공진기 개발	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 공진기 설계</li> <li>- 공진기 거울 고안 및 특성 분석</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 공진기 설계</li> <li>·초저온 저손실 원형도파관 공진기 설계</li> <li>·도파관손실 : 10%/m 이하</li> <li>- 공진기 거울 고안 및 특성 분석</li> <li>·메쉬거울의 전자빔/테라헤르츠파 투과 특성분석</li> <li>·전자빔손실 : 0.3% 이하</li> <li>·THz 반사율 : 80-95%</li> </ul>
3-5 고출력 테라헤르츠 영상기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 조사장치 개념설계</li> <li>- 테라헤르츠 영상 기술동향 분석</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 원격조사장치 개념설계</li> <li>·결맞음 THz 영상 기술</li> <li>- 테라헤르츠 계측기, 영상기술 동향 분석 및 국제공동실험</li> <li>·BNP와 공동으로 수행</li> <li>·2차원 테라헤르츠 계측기 감도 및 테라헤르츠 결맞음 영상 측정</li> </ul>

## 제 2 절 목표대비 달성도

핵심 성과지표(가중치)	'10 사업수행 성과	당해년도 목표달성도	최종 목표달성도
1. 소형 마이크로트론 가속기 개발 (20%)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 소형 가속기 설계</li> <li>•에너지 : 5 MeV</li> <li>- 마이크로트론 마그네트 제작</li> <li>•자기장 : 1 kG (<math>\pm</math> 0.1%)</li> </ul>	100	10
2. 빔광학계 및 차폐체 개발 (20%)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 빔광학계 설계</li> <li>•휨자석 및 사중극자석</li> <li>•교번자장기 입사빔직경 : 2 mm 이하</li> <li>- 차폐 구조 평가 및 설계</li> <li>•Geant4 이용 모의실험</li> <li>- 사중극 자석 제작</li> <li>•자기장기울기 : &gt; 10 T/m</li> </ul>	100	10
3. 나선형 교번자장기 개발 (25%)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 교번자장기 자기장 구조 설계</li> <li>•자기장세기 : 3-7 kG</li> <li>- 3차원 초전도 자기장구조 및 전자빔궤적/레이저이득 분석 완료</li> </ul>	100	15
4. 저손실 테라헤르츠 원형도파관 공진기 개발 (25%)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 공진기 설계</li> <li>•초저온 저손실 원형도파관 공진기 설계</li> <li>•도파관손실 : 10%/m 이하</li> <li>- 공진기 거울 고안 및 특성 분석</li> <li>•메쉬거울의 전자빔/테라헤르츠파 투과 특성분석</li> <li>•전자빔손실 : 0.3% 이하</li> <li>•THz 반사율 : 80-95%</li> </ul>	100	10
5. 고효율 테라헤르츠 영상 기술 개발 (10%)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 원격조사장치 개념설계</li> <li>•결맞음 THz 영상 기술</li> <li>- 테라헤르츠 계측기, 영상기술 동향분석 및 국제공동 실험</li> <li>•BNP와 공동으로 수행</li> <li>•2차원 테라헤르츠 계측기 감도 및 테라헤르츠 결맞음 영상 측정</li> </ul>	100	10
합 계(100%)		100%	11%

## 제 5 장 연구개발 결과의 활용 계획

### 제 1 절 기대 효과

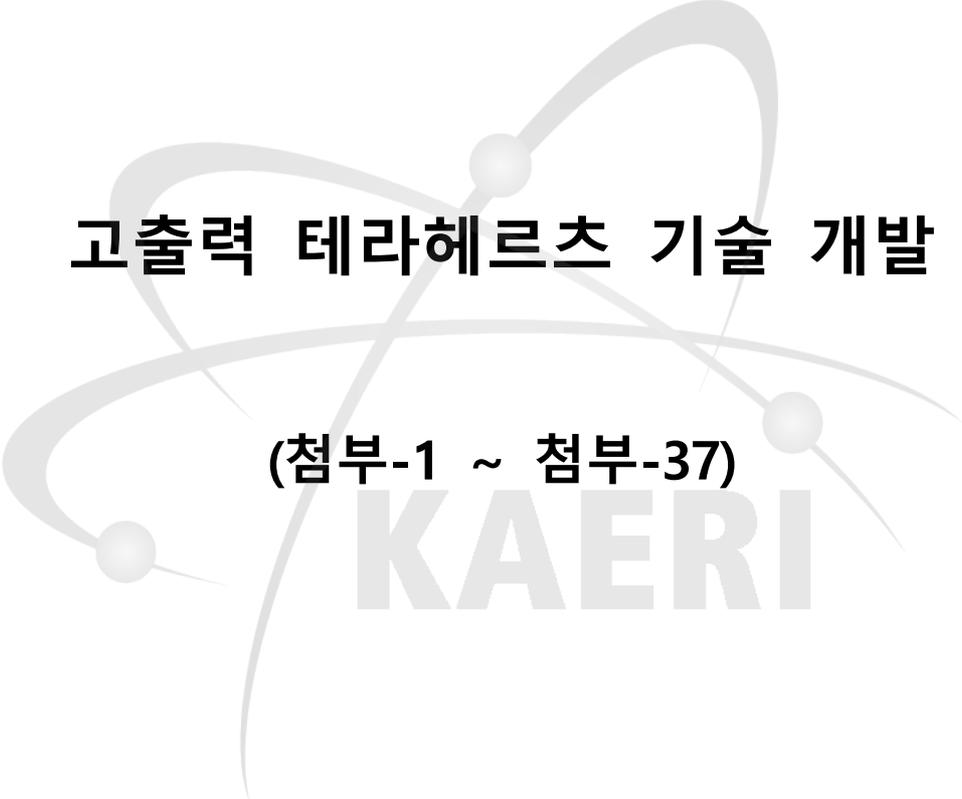
- 테라헤르츠 분야에 있어서 고출력화는 높은 잠재력을 현실로 바꿀 수 있는 중요한 기술적 과제임. 소형/저출력 테라헤르츠 장치의 한계를 극복하고, 보안검색 및 의료 현장에서 사용할 수 있는 테라헤르츠 장치의 출력은 1 W급 이상임.
- 본 연구개발을 통하여, 고출력과 소형화를 동시에 실현하는 고출력 테라헤르츠 원천기술을 확보함으로써 테라헤르츠 국가 산업경쟁력 강화에 크게 기여할 것으로 판단됨.
- 미국, 영국, 일본, 유럽 등 선진국을 중심으로 대인, 대물용 차세대 보안검색 기술에 대한 수요와 시장이 급격히 확대될 것으로 예상됨.
- 특히, 고출력 테라헤르츠 분야의 원천기술 확보 여부는 미래 시장에서의 국가경쟁력과 직결되어 있어서 집중적인 투자가 필요한 부분임.
- 미국의 경우만을 고려할 때도 공항의 수가 14,000여개로 이들을 대상으로 하는 테라헤르츠 검색 장치 시장은 1,000억불을 넘어서는 천문학적인 규모임. 세계 시장의 경우 이의 약 수~십배에 이를 것으로 추산됨.

### 제 2 절 활용 계획

본 과제는 2010년부터 시작되어서 2011년부터 주요사업의 기관고유사업에서 창의사업으로 이관되었음. 이관된 첫해가 창의사업 단계가 바뀌는 시점이라서 2년 연속으로 보고서를 제출함. 당해연도의 연구 결과는 차기연도의 고출력 테라헤르츠 발생장치 개발에 활용함.

## 제 6 장 참고문헌





# 고출력 테라헤르츠 기술 개발

(첨부-1 ~ 첨부-37)

KAERI

# 소형 마이크로트론 가속기 설계

## 주요 내용

마이크로트론 가속기는 크게 고주파 가속공동, 필전자석, 출사부 (extractor)로 구성되어 있고, 주어진 고주파 공진 주파수에서 가속 에너지와 자기장의 세기 조건을 구하고 simulation을 이용하여 가속 공동 구조를 최적화한다.

### ■ 주요 설계 변수

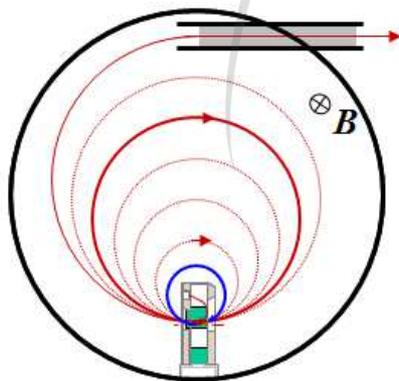
- 전자빔 에너지: ~ 5 MeV (K.E)
- 공진 주파수: 2.8 GHz

### ■ 전자빔 회전 주기와 고주파 공진주파수와 동기화 조건

- 균일자기장에서의 전자빔의 회전운동:  $\frac{\gamma m_0 v^2}{r} = evB$  ( $T = \frac{2\pi}{\omega}$ )
- n<sup>th</sup> 궤도에서의 가속 에너지:  $\gamma_n = 1 + \gamma_{inj} + n\Delta\gamma_g$

### ■ 전자빔 소멸화 조건

- 회전 반경 : 자기장 B 가 높을 수록 회전 반경 축소
- 회전 궤도 수: 가속에너지 ( $\Delta\gamma_g$ )가 높을 수록 회전 궤도수 감소
- Fundamental mode :  $l' = 2l$



### 1st 궤도 도달 시간

$$T_1 = \frac{2\pi m_0}{eB} (1 + \gamma_{inj} + \Delta\gamma_g) \equiv \frac{l'}{f_{RF}}$$

### n<sup>th</sup> 궤도 간의 도달 시간

$$\Delta T = T_{n+1} - T_n = \frac{2\pi m_0}{eB} \Delta\gamma_g = \frac{l}{f_{RF}}$$

( $l, l'$ : integer,  $l < l'$ )

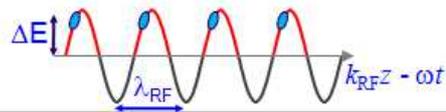


그림. 균일 자기장에서 전자빔 회전 운동 및 고주파 가속 동기화

## 소형 마이크로트론 가속기 설계

### 주요 내용

#### 동기화 조건 계산 결과 및 Type 선택.

- **Type I: 저 고주파 전압, 저 전류 (전자기석용)**
  - 가속에너지: ~ 0.511 MeV/turn (가속장 : ~ 33 MV/m)
  - 자기장: 1.0 ~ 1.1 kG
  - 궤도수 및 궤도 직경: 9 ~ 10 turns, ~ 340 mm
  - RF 출력 손실: 평균 110W @ 100 Hz (5 μsec)
- **Type II : 소형**
  - 가속에너지: ~ 1.022 MeV/turn (가속장 : 57 ~ 72 MeV/m)
  - 자기장: 2.0 ~ 2.5 kG
  - 궤도수 및 궤도 직경 : 3 ~ 4 turns, 130~170 mm
  - RF 출력 손실: 평균 430W @ 100 Hz (5 μsec)
- **Type I 선택: 사유**
  - Type II는 높은 고주파 전압 필요하고 고주파 전압 손실 및 열전자 흡수에 의한 온도 상승, 주파수 안정화 문제 심화.
  - 높은 자기장을 위한 높은 전류는 냉각 코일 필요
  - 궤도 간격이 좁아 출사부 (extractor) 설계 및 설치가 까다로움.

(\*  $d_{gap} = 17.0 \text{ mm}$  and  $f_{RF} = 2.801 \text{ GHz}$ )

$E_{inj}$ [keV]	V [keV]	$E_{acc}$ [MV/m]	B [T]	n	Energy [MeV]	$d_n$ [mm]	$\Delta d_{last}$ [mm]
0.00	511.01	30.06	0.1001	10	5.621	373.2	34.22
30.31	541.32	31.84	0.1060	9	5.413	339.2	32.32
50.54	561.55	33.03	0.1100	9	5.615	339.3	31.14
56.78	567.78	33.40	0.1112	9	5.678	339.3	30.80
127.75	638.76	37.57	0.1251	8	5.749	305.4	27.37
511.01	1022.0	60.12	0.2001	4	5.110	169.5	17.13
766.51	1277.5	75.15	0.2502	3	5.110	135.6	13.70

표. 입사에너지에 따른 가속장, 자기장, 궤도수 조건

## 소형 마이크로트론 가속기 설계

### 주요 내용

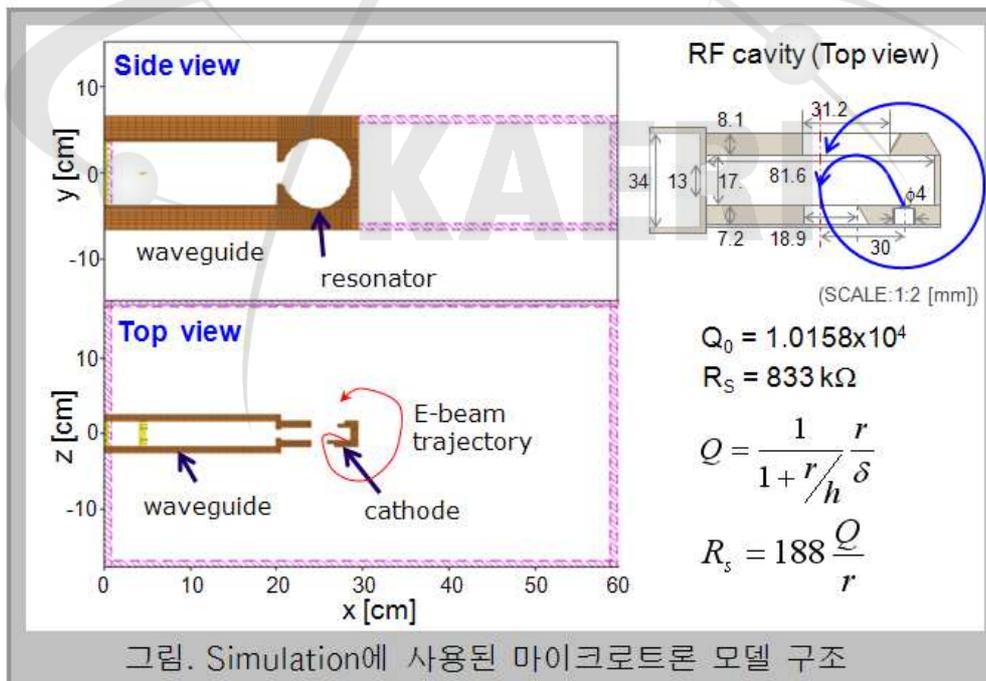
마그네트론 또는 클라이스트론 등의 고출력, 고주파 발전 시스템으로부터 생성된 RF를 마이크로트론의 공진기부 coupling 시켜 전자빔을 가속시키는 것을 3D Particle-In-Cell (PIC) code (MAGIC3D) 로 설계.

#### ■ 설계 변수

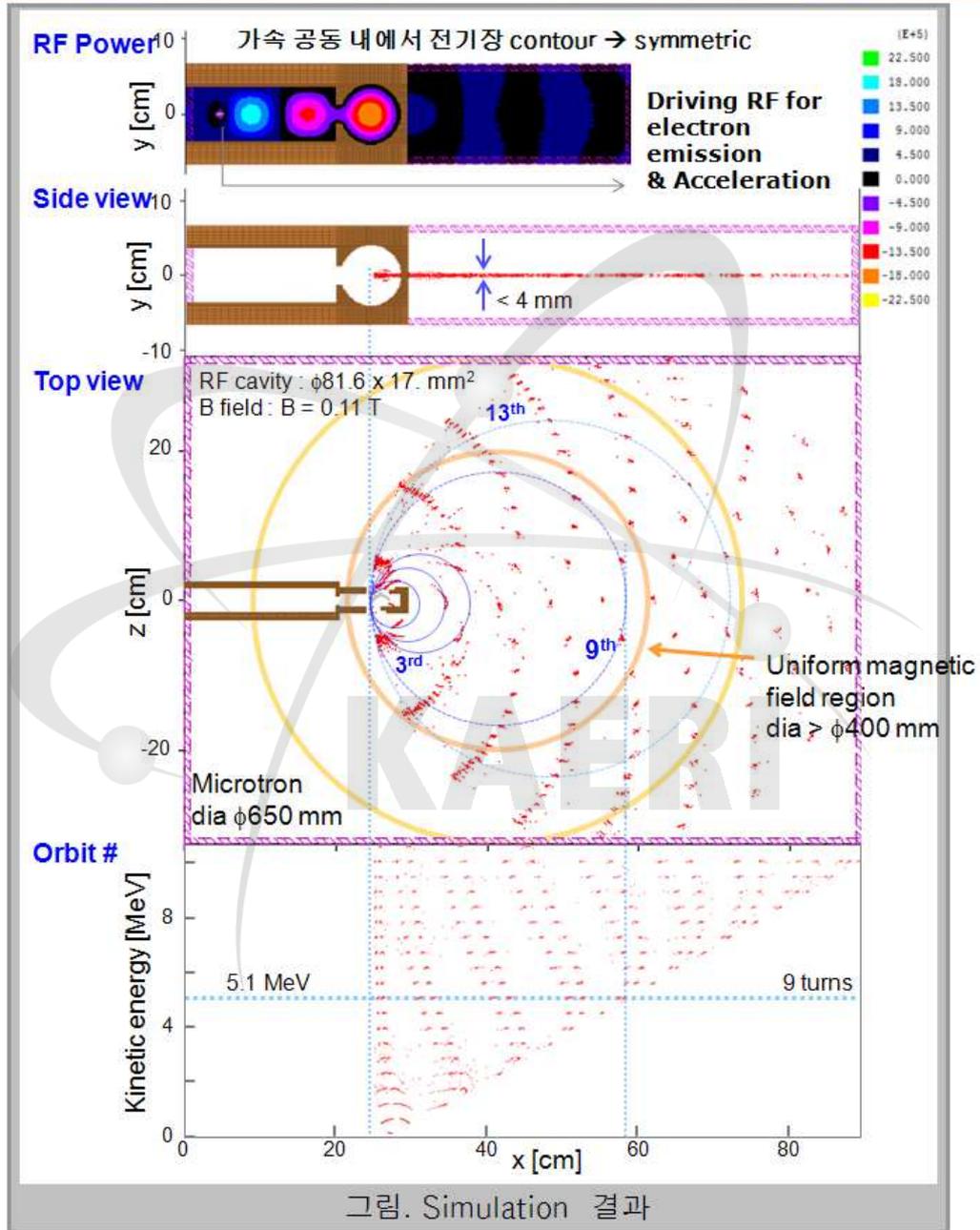
- 공진 주파수: 2.8 GHz; 자기장: ~1.1 kG
- Waveguide: 200x34 mm<sup>2</sup> 직사각형, Coupling gap: 13 mm
- 가속 공동 : 직경 81.6 mm 높이 17 mm 원통형

#### ■ 설계 방식

1. 고주파 출력 조건에서 가속 공동 및 RF coupling 변수 설계
2. 주어진 자기장에서 RF 출력 조절하여 동기화 조건 설계



# 소형 마이크로트론 가속기 설계



## 마이크로트론용 고정밀 전자석 설계

### 주요 내용

이론 및 전산 모사 설계 계산 결과에 의한 마이크로트론 및 고정밀 전자석 설계 및 제작

#### ■ 주요 설계 변수

- 균일 자기장: 0.9 ~ 1.4 kG, 0.01% 균일 정밀도
- 유효 자기장 영역: 직경  $\phi 490$  mm, Gap 간격 95 mm
- 고진공:  $10^{-7}$  torr

#### ■ 마이크로트론 사양

- 크기: 직경  $\phi 650$  mm x 높이 269 mm
- iron yolk (S20C)

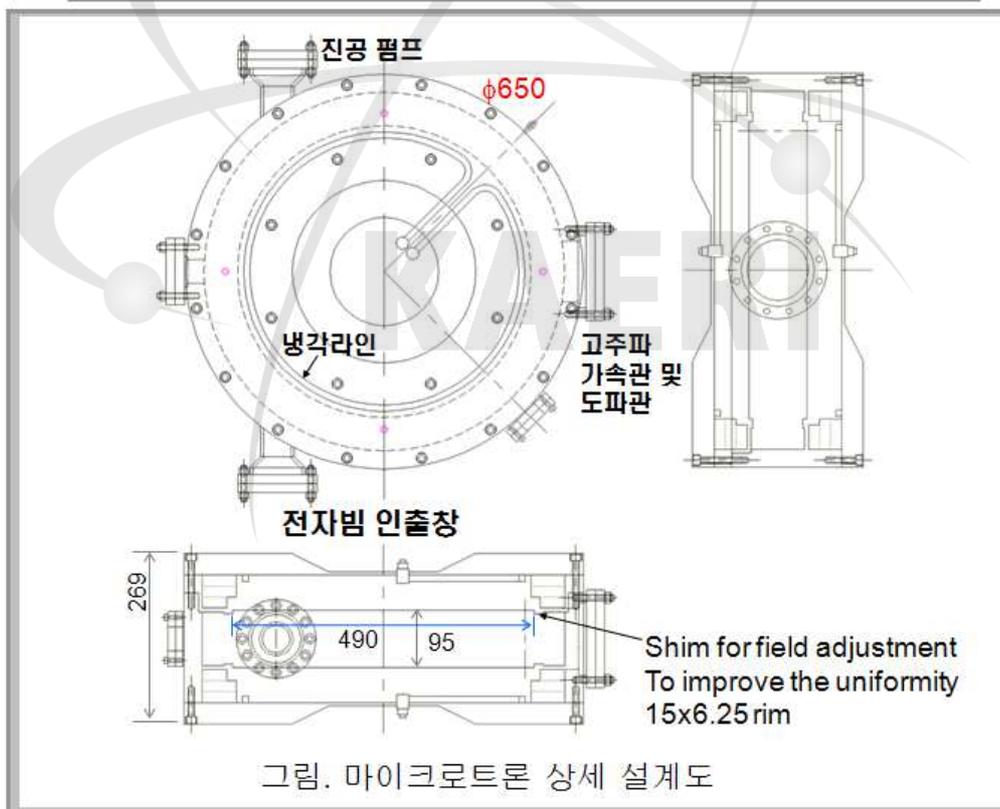


그림. 마이크로트론 상세 설계도

# 마이크로트론용 고정밀 전자석 설계

## 주요 내용

Simulation code를 이용하여 균일한 자기장 분포를 위한 shim 사양 선택

### ■ 주요 설계 결과

- Shim: 폭 15 mm × 높이 6.25 mm 내경 (직경)  $\phi 490$  mm
- 자기장: 0.9 ~ 1.4 kG  $\rightarrow$  전류 변화 30 ~ 50 A, 2x3 coils
- 균일도: 0.01% 정밀도 (직경  $\phi 400$  mm 영역)

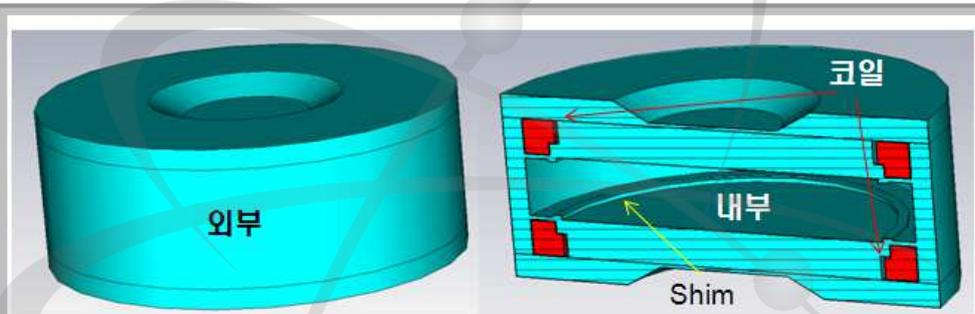


그림. 전산모사를 위한 마이크로트론 도면

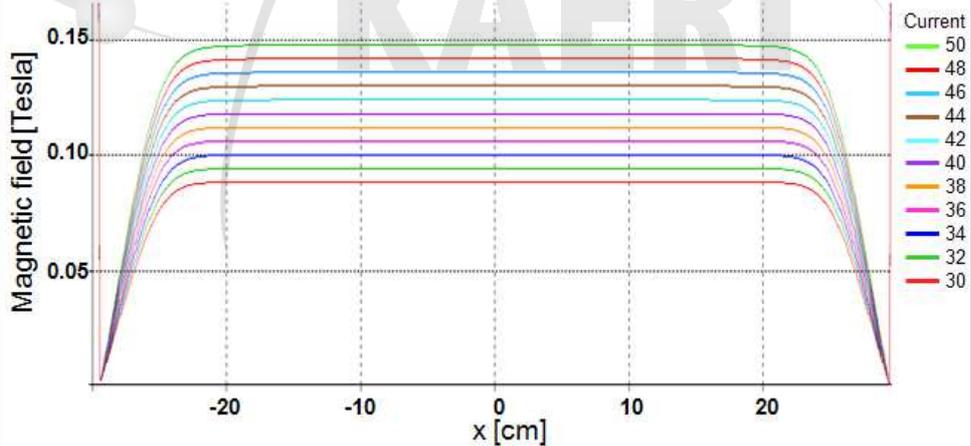


그림. 마이크로트론 중심에서 자기장 분포

# 소형 전자빔 광학계 최적화 설계

## 주요 내용

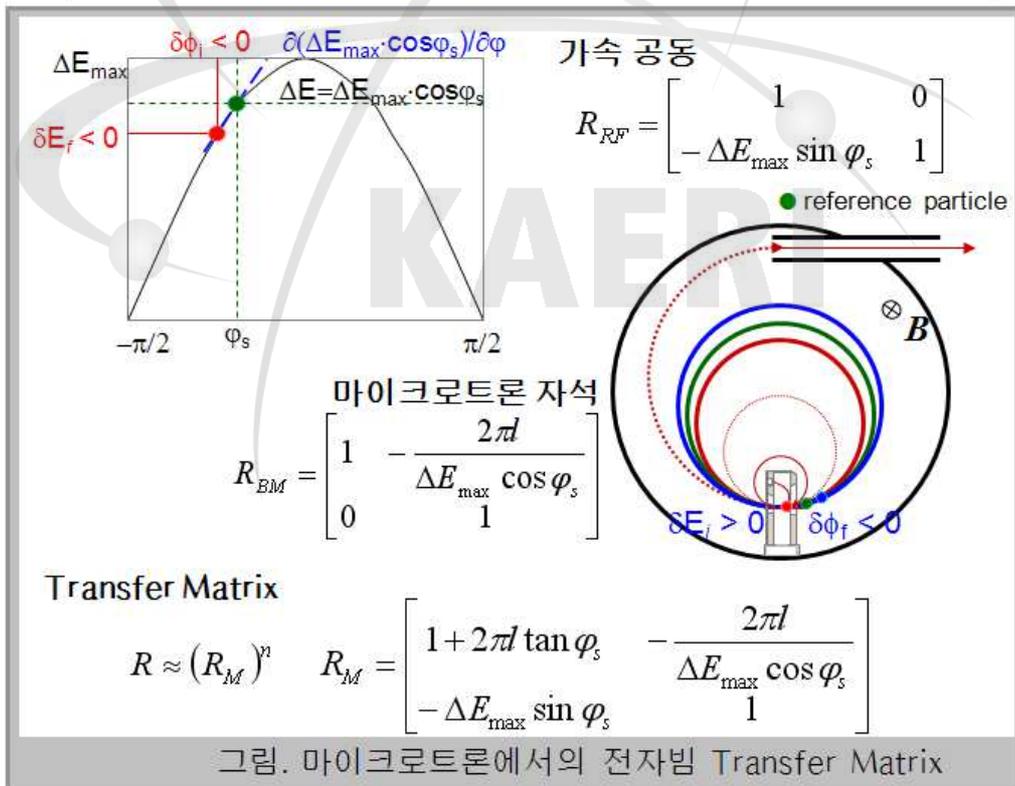
마이크로트론 가속기는 고주파 가속공동, 편전자석으로 구성되며, n번 회전/가속된 전자빔은 출사되어 빔광학계를 지나 Undulator에 입사된다

### ■ 마이크로트론에서의 전자빔 Transfer Matrix

- 가속 전압:  $\Delta E = \Delta E_{\max} \cos \varphi_s$      $\delta E_f = -\delta \phi_i \cdot \Delta E_{\max} \cdot \sin(\varphi_s) + \delta E_i$
- 휨자석:  $B = \frac{2\pi}{ec\lambda_{RF}l} \Delta E \cos \varphi_s$      $\frac{\delta E}{\Delta E} = -\frac{2\pi\delta\rho}{\lambda_{RF}l} = -\frac{\delta s}{\lambda_{RF}l} = -\frac{\delta\phi}{2\pi l}$

### ■ 마이크로트론에서의 고주파 가속 전압 위상 조건

- 안정 조건  $-\tan^{-1}(2/\pi l) < \varphi_s < 0$  :  $-32.48^\circ < \varphi_s < 0^\circ$



# 소형 전자빔 광학계 최적화 설계

## 주요 내용

### 마이크로트론에서의 Longitudinal Twiss 변수값

- 마이크로트론에서의 전자빔 Transfer Matrix 및 Twiss 변수값

$$(R_M)^n = \begin{bmatrix} \cos n\psi_Q + \alpha \sin n\psi_Q & \beta \sin n\psi_Q \\ -\gamma \sin n\psi_Q & \cos n\psi_Q - \alpha \sin n\psi_Q \end{bmatrix}$$

$$\alpha = \frac{\pi \tan \varphi_s}{\sin \psi_Q} = \frac{\cos \psi_Q - 1}{\sin \psi_Q} \quad \beta = -\frac{1}{\sin \psi_Q} \frac{2\pi}{\Delta E_{\max} \cos \varphi_s}$$

$$\cos \psi_Q = 1 + \pi \tan \varphi_s \quad \gamma = (1 + \alpha^2) / \beta$$

- 마이크로트론에서 n 궤도 후 전자빔 에너지 퍼짐도

$$\delta E_n = -\frac{\Delta E_{\max} \cos \varphi_s}{2\pi l} \tan \frac{1}{2} \psi_Q \sin n\psi_Q \delta \phi_0 + \frac{\cos(n - \frac{1}{2})\psi_Q}{\cos \frac{1}{2} \psi_Q} \cdot \delta E_0$$

$$\sin n\psi_Q \rightarrow 0 \Rightarrow \delta E_n = \delta E_0$$

- 고주파 jitter에 의한 영향

- 출력 jitter:  $\delta E_f = (1 + \delta E_{RF}^r) \Delta E_{\max} \cos \varphi_s^\delta \delta \phi_0 \approx -\delta E_{RF}^r \sec \varphi_s$
- 위상 jitter:  $\delta E_f = \Delta E_{\max} \cdot (1 - \cos \delta \varphi_{RF})$

- 고주파 출력 가속 조건 :

- 출력 전압: 560 ~ 590 kV, < 0.1% jitter
- 가속 위상: ~ -14.8°

$\varphi_s$ [°]	-4.259° @ $\psi_Q = -40^\circ$			-14.737° @ $\psi_Q = -80^\circ$		
	$\varphi_s^\delta$ [°]	$Q_L$	$\delta\phi$ [°]	$\varphi_s^\delta$ [°]	$Q_L$	$\delta\phi$ [°]
1	-9.1177	0.1674	4.8587	-16.7586	0.2414	2.0215
0.1	-4.9686	0.1205	0.7096	-14.9531	0.2243	0.2161
0.01	-4.3352	0.1121	0.0762	-14.7588	0.2224	0.0218

표. RF 출력 jitter에 의한 위상 변화

# 소형 전자빔 광학계 최적화 설계

## 주요 내용

마이크로트론 전자석(180°)에 의한 Dispersion 포함한 Twiss 변수값은 빔광학계 설계 초기 변수값으로 사용됨.

### ■ 퓌전자석에 의한 Transfer Matrix

- Vertical weak focusing

- Dispersion:  $D_x = 2\rho$

$D'_x = 0$

- 전자빔 horizontal 크기 증가

$$R_{yz} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2\rho \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \pi\sqrt{n}\rho & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\pi\sqrt{n}\rho^{-1} & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -2\rho & 0 & 0 & 1 & \Delta \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

### ■ 마이크로트론 180° 출사 위치에서의 전자빔 변수

$B = 0.108 \text{ T}, E_{\text{acc}} = 33.3 \text{ MV/m (9 tracks)}$

$E_e = 5.515 \text{ MeV}$

$D_x = 0.34 \text{ m}; D'_x = 0$

$\epsilon_x = 2.25415; \epsilon_y = 0.0779525 \text{ mm}\cdot\text{mrad.}$

$\beta_x = 0.147855; \beta_y = 0.801265 \text{ m}$

$\alpha_x = -2.96432; \alpha_y = -0.445662$

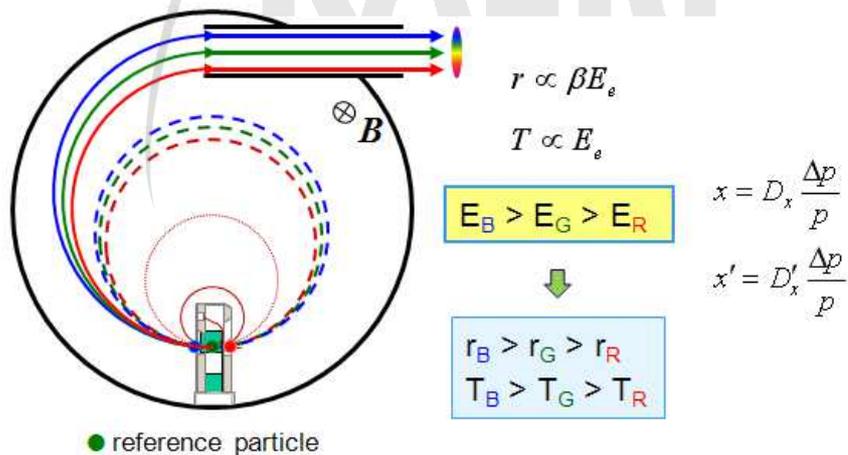


그림. 전자빔의 에너지 퍼짐에 의한 180° extraction에서의 Dispersion

## 소형 전자빔 광학계 최적화 설계

### 주요 내용

마이크로트론에서 가속/180° 출사된 전자빔은 Helical Undulator 자기장에 의해 나선운동을 하며 진행하는데 발진 이득이 극대화되도록 입사 조건에 맞게 빔 광학계를 설계한다.

#### ■ 빔광학계 설계 변수 : Extractor

- 전자빔 K.E. 에너지: ~ 5 MeV (K.E)
- 에너지 퍼짐도: <0.01%
- 에미턴스:  $\epsilon_x = 2.25415 (10)$ ,  $\epsilon_y = 0.0779525 (0.1)$  [mm-mrad]
- Twiss 변수값:  $\beta_x [m] = 0.13 / \alpha_x = -2.8$     $\beta_y [m] = 1.4 / \alpha_y = -0.1$   
 $D_x [m] = 0.37, D'_x = 0,$     $D_y [m] = 0, D'_y = 0$

#### ■ 빔광학계 설계 조건 : Undulator

- Beta function fitting: 사중극 자석 세기 변화  
(q1, q2, q3, q4, q5, q6, q7, q8)
- Undulator 앞에서의 Twiss 변수값: < 500  $\mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$   
 $\beta_x [m] = 0.047 / \alpha_x = 0$     $\beta_y [m] = 0.047 / \alpha_y = 0$   
 $D_x [m] = 0, D'_x = 0,$     $D_y [m] = 0, D'_y = 0$
- 빔 광학계 크기 최소화

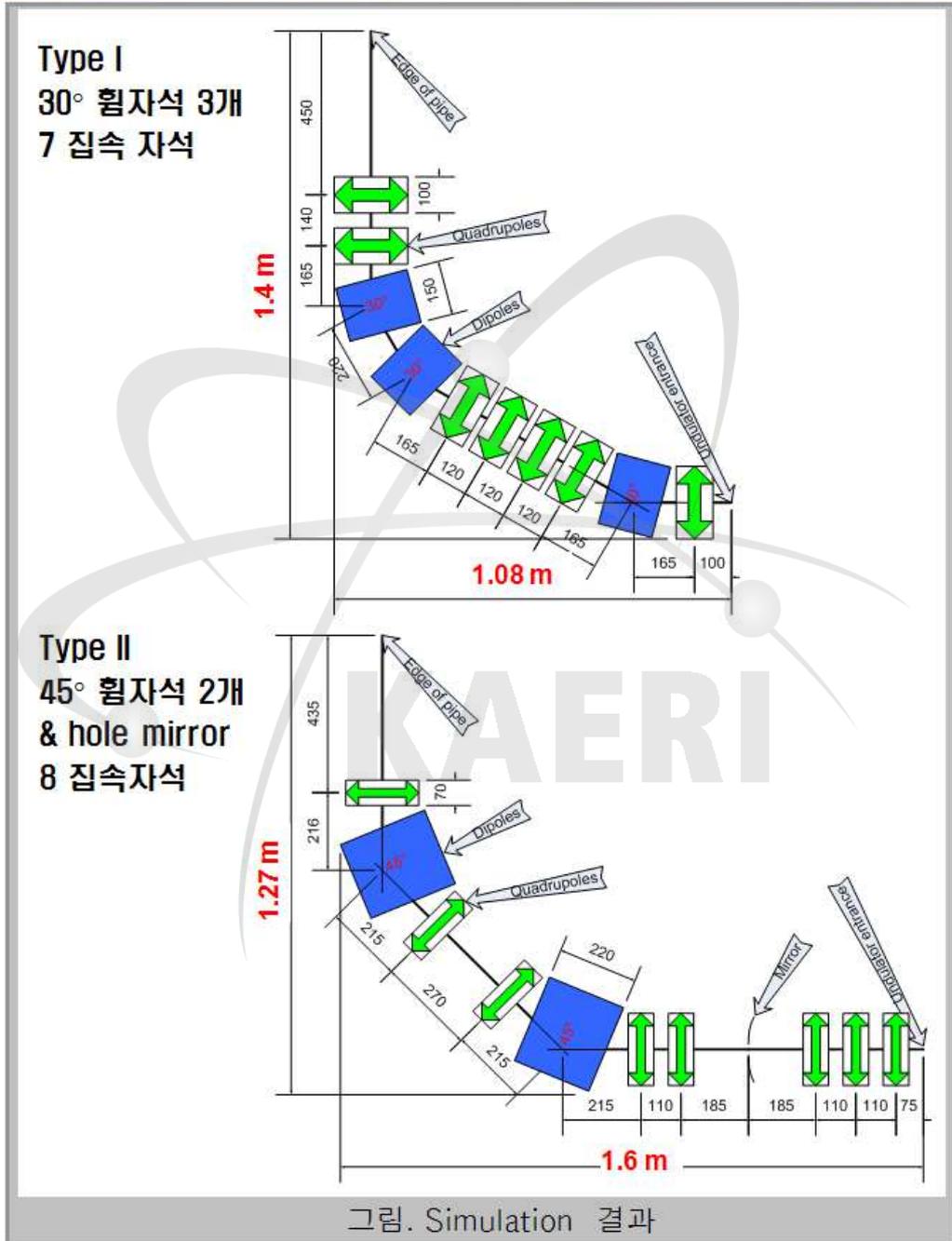
#### ■ 빔광학계 구성

1. Type I : 3개의 30° 휨자석 사용
2. Type II : 2개의 45° 휨자석 사용 + hole mirror
3. Type III : 2개의 45° 휨자석 사용 + Mesh mirror

#### ■ 빔광학계 설계 결과

1. Type I : 1.07 x 1.08 m<sup>2</sup> , 7 QM
2. Type II: 0.95x 1.60 m<sup>2</sup> , 8 QM
3. Type III: 0.84 x 1.11 m<sup>2</sup> , 6 QM

## 소형 전자빔 광학계 최적화 설계



## 소형 전자빔 광학계 최적화 설계

Type III  
 45° 횡자석 2개  
 & Mesh mirror  
 8 집속자석

N	Name	S [cm]	L [cm]	B [kG]	G [T/m]	Bend [°]
1	o1	40	40			
2	q1	47	7	0	0.7769	
3	o2	53	6			
4	g1	53	0	0.6378	22.5	
5	b1	75.576	22.58	0.6378	0	44.97
6	g1	75.576	0	0.6378	22.5	
7	o2	81.576	6			
8	q2	88.576	7	0	-1.0572	
9	o2	94.576	6			
10	q3	101.576	7	0	1.9526	
11	o2	107.576	6			
12	g1	107.576	0	0.6378	22.5	
13	b1	130.152	22.58	0.6378	0	44.97
14	g1	130.152	0	0.6378	22.5	
15	o2	136.152	6			
16	q4	143.152	7	0	3.1278	
17	o3	150.152	7			
18	q5	157.152	7	0	-2.7566	
19	o3	164.152	7			
20	q6	171.152	7	0	0.7106	
21	o4	181.152	10			

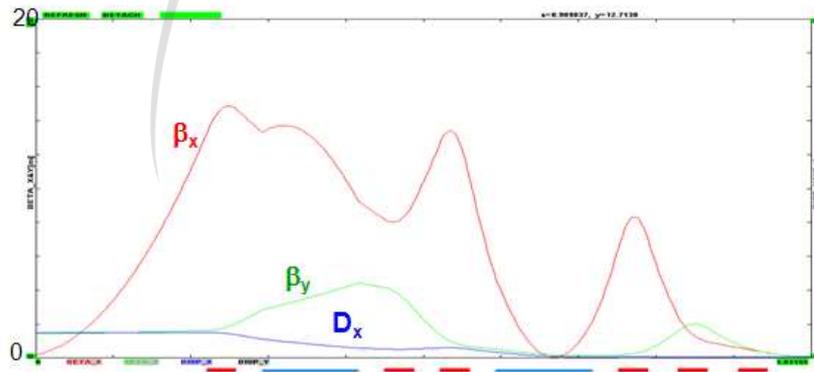
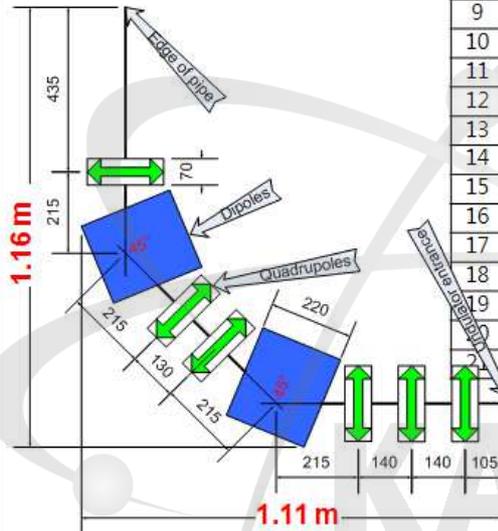


그림. Simulation 결과

## 3-D 자기장 해석 코드를 이용한 영구자석형 사중극 집속 자석 설계

### 주요 내용

3D 자기장 해석 코드를 이용하여 영구자석형 사중극자석을 설계하였다. 시뮬레이션 결과, core의 내경이 약 9 mm 일 때, 사중극 자석 중심축에서의 Magnetic field gradient 는 344 T/m 이다. 같은 두께에서 내경이 50 mm이면 약 25 T/m, 내경이 70 mm 이면 약 8 T/m 이다. 두께가 20mm인 영구자석을 이용한 빔광학계는 2~10 T/m의 자기장 세기를 필요로 하므로 영구자석을 사용함으로써 공간 효율을 높일 수 있다.

표. Simulation Parameters

Permanent Magnets	NdFeB (1.2 T)
Iron Poles	Soft Iron

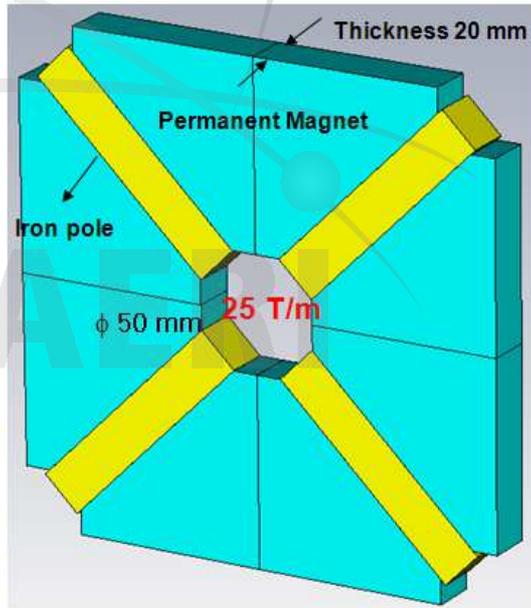
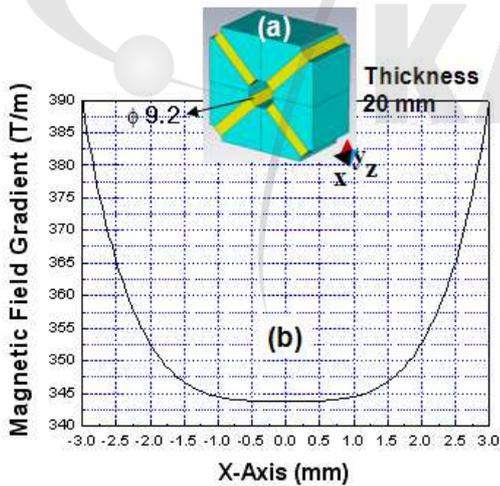


그림 . 두께 20 mm, 외경이 50 mm인 경우.  $K = 25$  T/m

그림 . 3D 자기장 해석 코드를 이용한 사중극자석 시뮬레이션 결과.

- (a) 사중극 자석 기본 설계 구조,
- (b) 사중극 자석 중심에서의 Magnetic field gradient.

# 가속기 차폐를 위한 방사선 평가 및 차폐 설계

## 주요 내용

고출력 THz 발생장치는 전자빔을 이용한 자유전자레이저 시스템으로, 소형화를 위해 전자빔에 의한 방사선 안전 평가를 통한 최적의 차폐 설계가 필요하다. 전자빔 손실이 예측되는 부분을 GEANT4 code를 이용한 Monte Carlo Simulation 계산으로 평가 및 설계를 하였다.

### ■ 전자빔 손실 발생 예측값

: 설계 변수 : 전자빔 5.5 MeV, 50 mA/5  $\mu$ sec,  $1.56 \times 10^{12}$  개/pulse

#### ① 마이크로트론 가속기:

가속 공동 - 1 MeV이하의 전자빔, 50 mA/5  $\mu$ sec

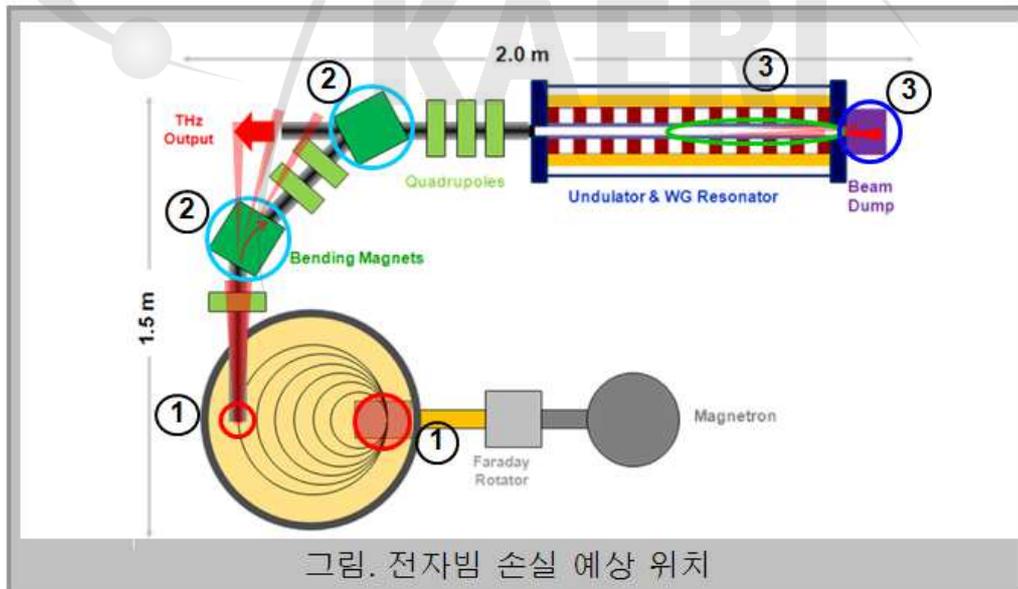
전자빔 인출 부분 - 5.5 MeV, <10% of 50 mA/5  $\mu$ sec

#### ② 빔전송계: 45° 휨자석: < 0.1% 손실

#### ③ 빔덤프/Undulator

waveguide: <1% 손실

- 빔덤프: 100% 덤프 (㉔)



# 가속기 자폐를 위한 방사선 평가 및 차폐 설계

## 주요 내용

### 마이크로트론에서 발생하는 방사선 평가 및 차폐

#### ■ 설계 변수

- 전자빔 손실량

가속 공동: OFHP Cu - 면적  $5 \times 5 \text{ mm}^2$  두께 1 mm  
1 MeV 전자빔, 50 mA/5  $\mu\text{sec}$

Extractor: 무극성 SUS : 내/외경 8/16 mm 높이 15 cm 원통  
5.5 MeV, <10% of 50 mA/5  $\mu\text{sec}$

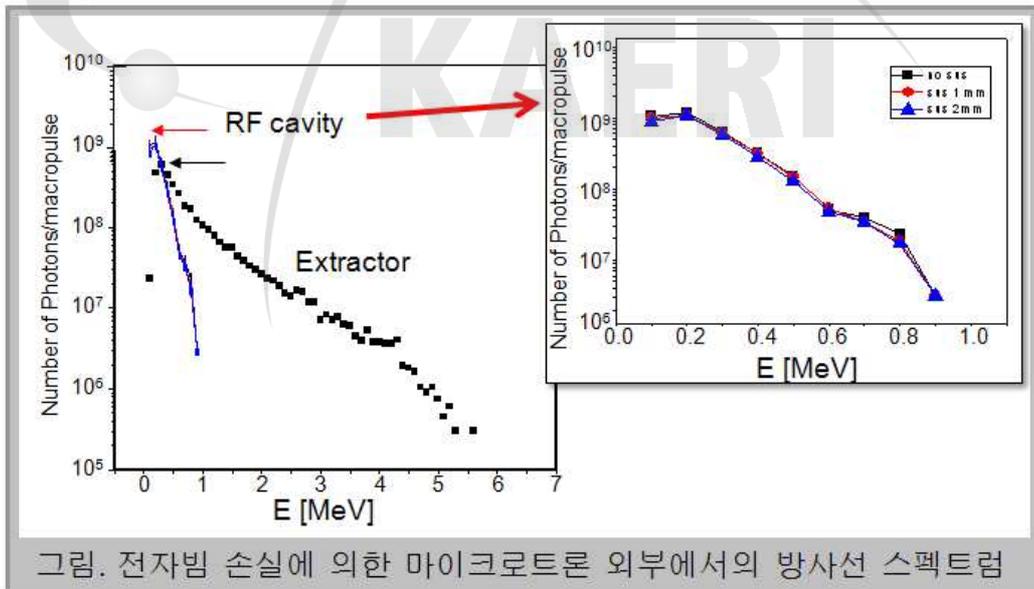
- 마이크로트론: Iron (S20C), 원통 + 위/아래 덮개

원통: 외경 65 cm, 두께 3 cm, 높이 8cm  
덮개: 직경 65 cm 두께 5 cm

#### ■ 방사선량 평가

- 전자빔 인출방향 국부 납차폐 필요:  $\sim 0.20 \text{ mJ}$ ,

- 가속공동내 손실에 의한 방출에너지:  $0.13 \text{ mJ}$ , <1MeV



# 가속기 차폐를 위한 방사선 평가 및 차폐 설계

## 주요 내용

### 빔전송 라인에서 발생하는 방사선 평가 및 차폐

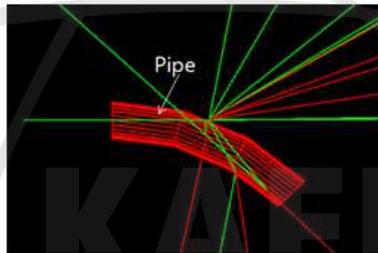
#### ■ 설계 변수

- 전자빔 손실량  
45° 휨자석:  $\phi 50$  mm × 두께 1~1.5 mm SUS 빔 파이프  
5.5 MeV 전자빔, 0.1% 손실

#### ■ 방사선량 평가

- 전자빔 국부 차폐 필요 : AL + Pb
- 전자빔 통과 에너지 : 0.6/0.3 mJ (1/1.5 mm 두께)
- 감마선 방출 에너지 : 0.12/0.13 mJ (1/1.5 mm 두께)

그림. Simulation Modeling



Gamma ray radiatio of Beam pipe

Electron energy distribtio of Beam pipe

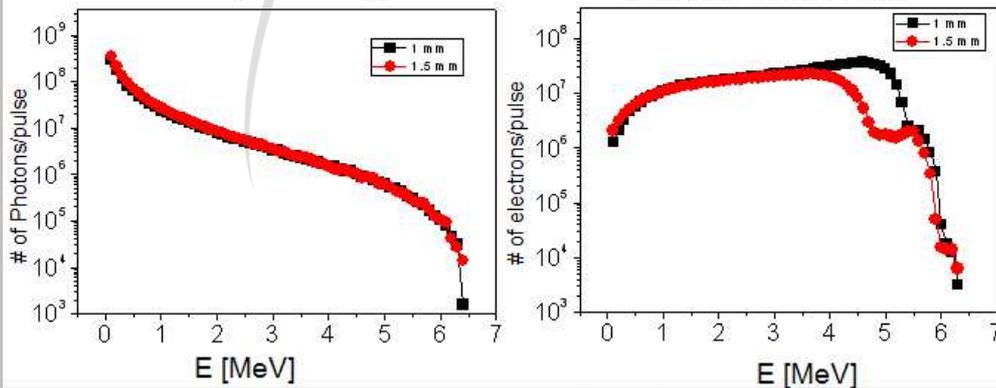


그림. 전자빔 손실에 의한 빔파이프 외부에서의 방사선 스펙트럼

# 가속기 차폐를 위한 방사선 평가 및 차폐 설계

## 주요 내용

### 빔덤프에서 발생하는 방사선 평가 및 차폐

#### ■ 설계 변수

- 전자빔 손실량 : 5.5 MeV 전자빔, 100% 손실, 직경 1 cm 이하
- 1차 차폐: 전자빔: Al
- 2차 차폐: 감마선: 납
- 구조: 반사빔을 줄이기 위한 구조 (그림참고)

#### ■ 방사선량 평가

- 1차 차폐: AL 3 cm
- 2차 차폐: 납 20 cm (진행방향) 납 10 cm (입구 및 측면 부분)
- 덤프 외부로 방출된 방사선 에너지: 0.08%

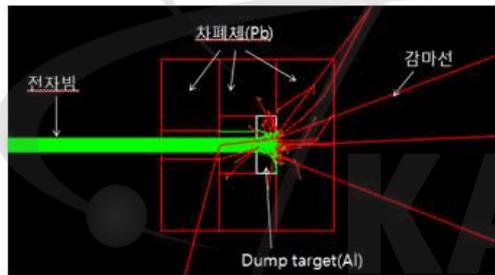


그림. 빔덤프 구조

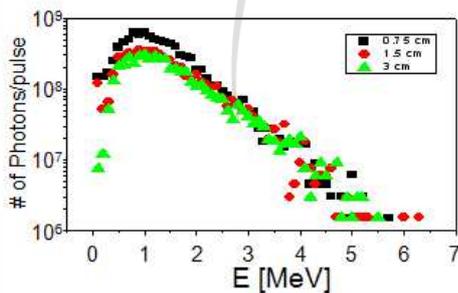


그림. Al 두께에 따른 방사선 스펙트럼

표. 두께에 따른 감마선 방출량

Al 두께 [cm]	방출에너지 /shot	Pb 두께 [cm]	방출에너지 /shot
0.75	1.95 mJ	2	19.04 mJ
1.5	1.34 mJ	4	6.83 mJ
3.0	1.16 mJ	5	4.16 mJ

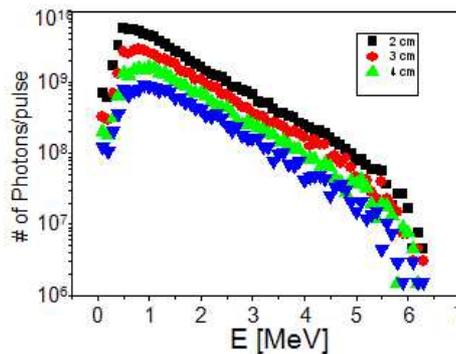


그림. Pb 두께에 따른 방사선 스펙트럼

## 가속기 차폐를 위한 방사선 평가 및 차폐 설계

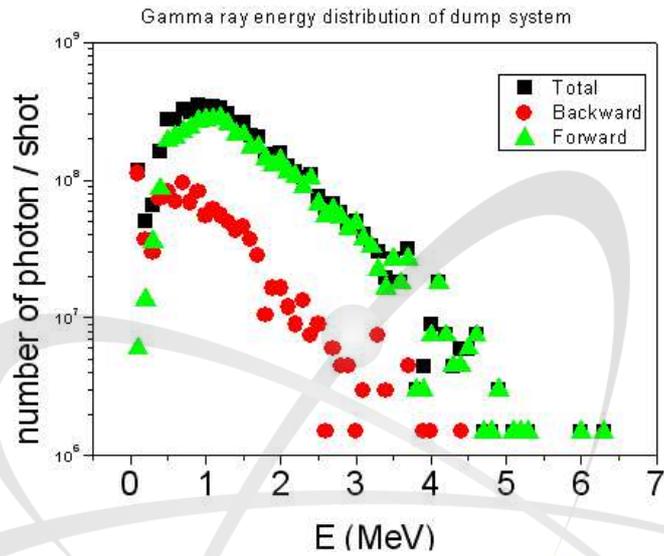


그림. 덤프외부에서 방향에 따른 감마선 방출량

표. 방사선 방출에너지

방향	방출에너지/ shot
전체	1.34 mJ
반사 방향	0.193 mJ
진행 방향	1.147 mJ

표. 덤프 매질에 흡수된 방사선 에너지

차폐 매질	흡수 에너지/ shot
알루미늄	1.53 J (94.56%)
납	0.087 J (5.36%)
방출 감마선	1.34 mJ (0.08%)

# 가속기 차폐를 위한 방사선 평가 및 차폐 설계

## 주요 내용

### 고출력 THz 발생장치 시스템 차폐 : 납

#### ■ 설계 변수

- 방사선 발생량: 각 위치에서 발생된 방사선량의 총합
- 납 상자 : 두께 10, 20 cm

#### ■ 방사선량 평가

- 10 cm 납 차폐체: 0.99  $\mu\text{J}$
- 20 cm 납 차폐체: None

#### ■ 발생 장치 시스템은 두께 10 cm 납 차폐으로 충분함.

- 이동성을 고려하여 두께를 직적화할 필요가 있음  
→ 예상 5 cm

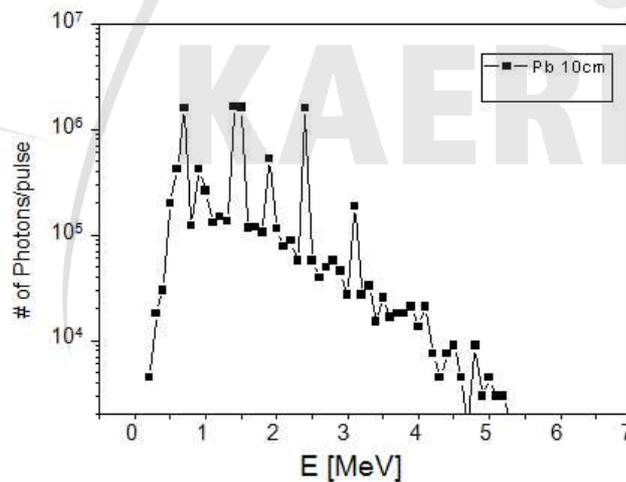


그림. 시스템 외부를 10 cm 납으로 차폐하였을 때 방출되는 감마선 분포 스펙트럼

# 3-D 자기장 해석 코드를 이용한 나선형 교번자장기 구조 설계

첨부-20

## 주요 내용

기존의 전자석을 사용하지 않는 Hybrid PM Undulator에 비해 강한 자기장을 구현할 수 있고 전자석 코일의 전류를 조절함으로써 자기장의 세기를 변화시킬 수 있는 Hybrid EM Helical Undulator 를 구조 설계하였다.

### Simulation Parameters

Waveguide (Copper)	Inner radius: 2 ~ 2.4 mm Outer radius: 2.5 ~ 3 mm
Current on each Coil	0~2000 A
Permanent Magnets (Br)	NdFeB (1.2 T)
Iron Poles	Soft Iron
Period Length of Undulator	25 ~30mm
Number of Periods	5

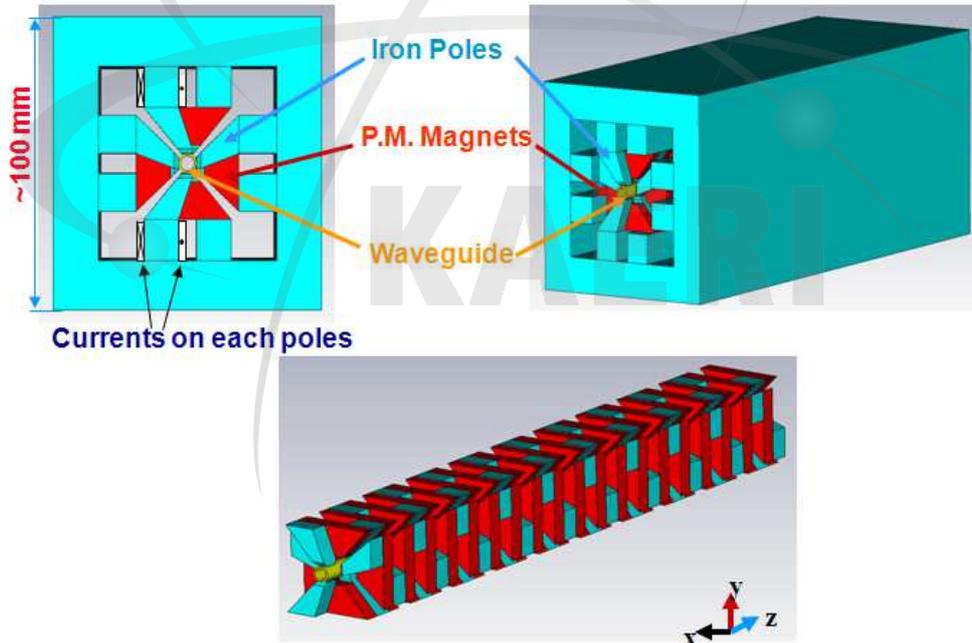


그림. 3-D 자기장 해석 코드를 이용하여 설계된 helical undulator의 구조.

## Undulator 주기( $\lambda_u$ )와 자극(pole)의 gap 에 따른 자기장 구조 분석

### 주요 내용

Hybrid EM Helical Undulator 에서의 자기장 구조를 최적화하기 위해 모든 동일 조건에서 undulator의 주기 ( $\lambda_u$ )와 자극(pole) 사이의 gap을 달리하면서 세가지 type의 시뮬레이션을 수행하였다.

### Simulation Parameters

#### < Simulation Model Type #1 >

Waveguide (Copper)	<u>Inner radius: 2 mm</u> <u>Outer radius: 2.5 mm (gap= 5 mm)</u>
Period Length of Undulator ( $\lambda_u$ )	<u>25 mm</u>
Number of Periods	5

#### < Simulation Model Type #2 >

Waveguide (Copper)	<u>Inner radius: 2 mm</u> <u>Outer radius: 2.5 mm (gap= 5 mm)</u>
Period Length of Undulator ( $\lambda_u$ )	<u>30 mm</u>
Number of Periods	5

#### < Simulation Model Type #3 >

Waveguide (Copper)	<u>Inner radius: 2.4 mm</u> <u>Outer radius: 3 mm (gap= 6 mm)</u>
Period Length of Undulator ( $\lambda_u$ )	<u>25 mm</u>
Number of Periods	5

## Undulator 주기( $\lambda_u$ )와 자극(pole)의 gap 에 따른 자기장 구조 분석

### 주요 내용

Simulation type #3의 계산 결과에서 최대자기장 0.702 T 를 얻을 수 있었다. 계산 결과에 대한 FFT 분석을 통하여 type #3의 자기장 구조가 가장 sine 형태에 가까운 분포를 가진 다는 것을 알 수 있었다.

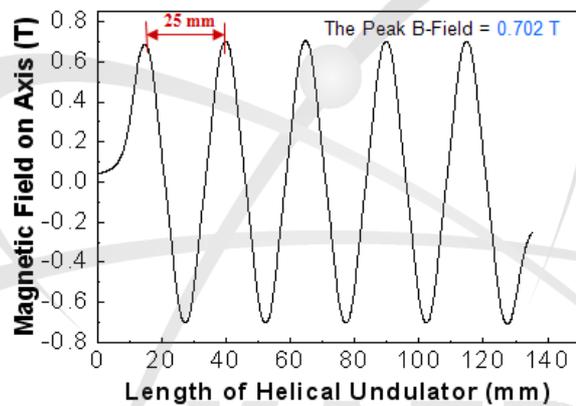


그림 1. Simulation Model Type #3에서의 시뮬레이션 계산 결과

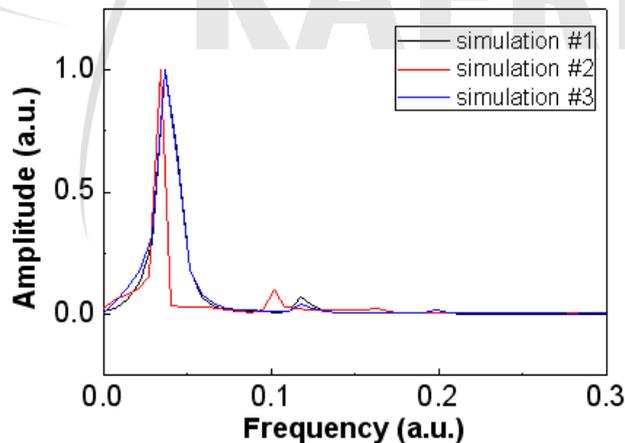


그림 2. 계산된 Simulation Model Type 각각에 대한 자기장 구조의 FFT 분석 결과

## 초전도 코일에 인가되는 전류의 세기에 따른 최대자기장 세기 분석

### 주요 내용

시뮬레이션 결과에서의 최적 조건인 Undulator의  $\lambda_u = 25$  mm, gap= 6 mm 일 때 초전도 코일에 인가되는 전류의 세기에 따른 최대자기장의 세기를 분석하였다.

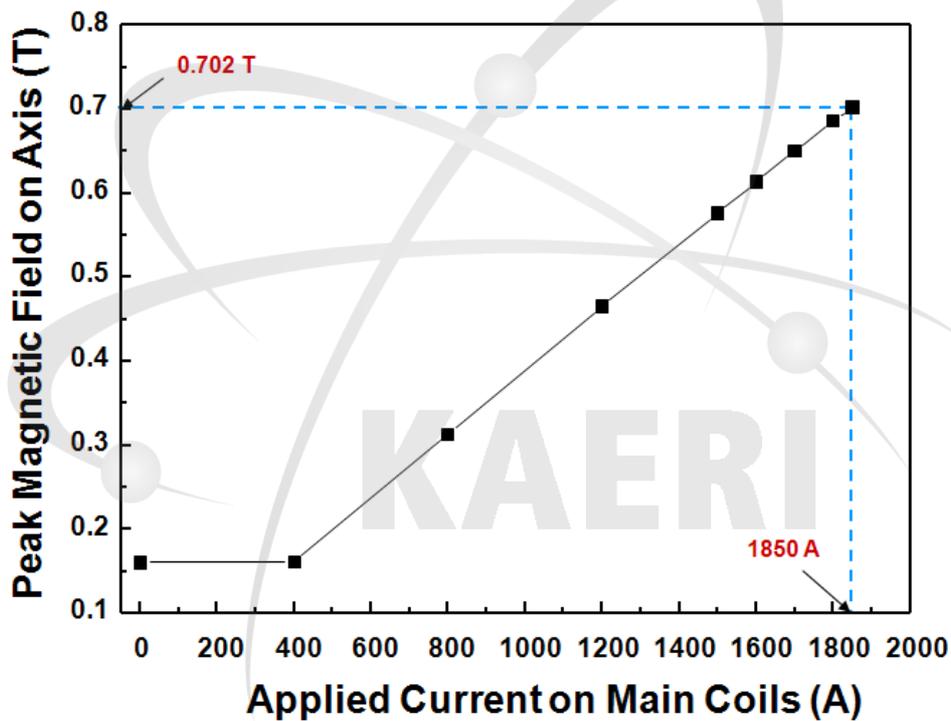


그림 . Simulation Model Type #3 의 조건에서 코일에 인가되는 전류의 세기에 따른 최대자기장 세기.

## Helical Undulator 단면에서의 자기장 분포 분석

### 주요 내용

시뮬레이션 결과에서의 최적 조건인 Undulator의  $\lambda_0 = 25$  mm, gap = 6 mm 일 때 Undulator 단면에서의 자기장 분포를 분석하였다. Waveguide 중심에서 자기장이 z-axis 로 진행하면서 회전하고 있는 것을 볼 수 있다.

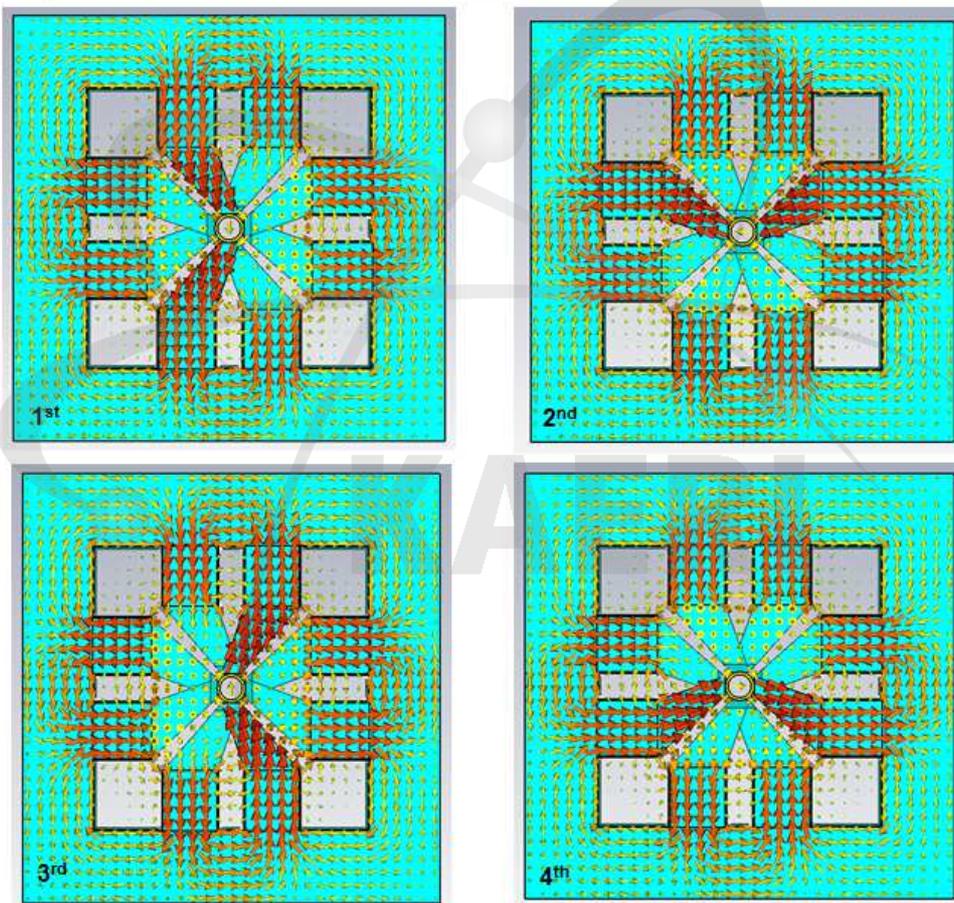


그림 . Simulation Model Type #3의 Undulator 단면에서의 자기장 분포

# 나선형 교번 자장기 자기장 성능 분석 - 전자빔 궤적 분석

## 주요 내용

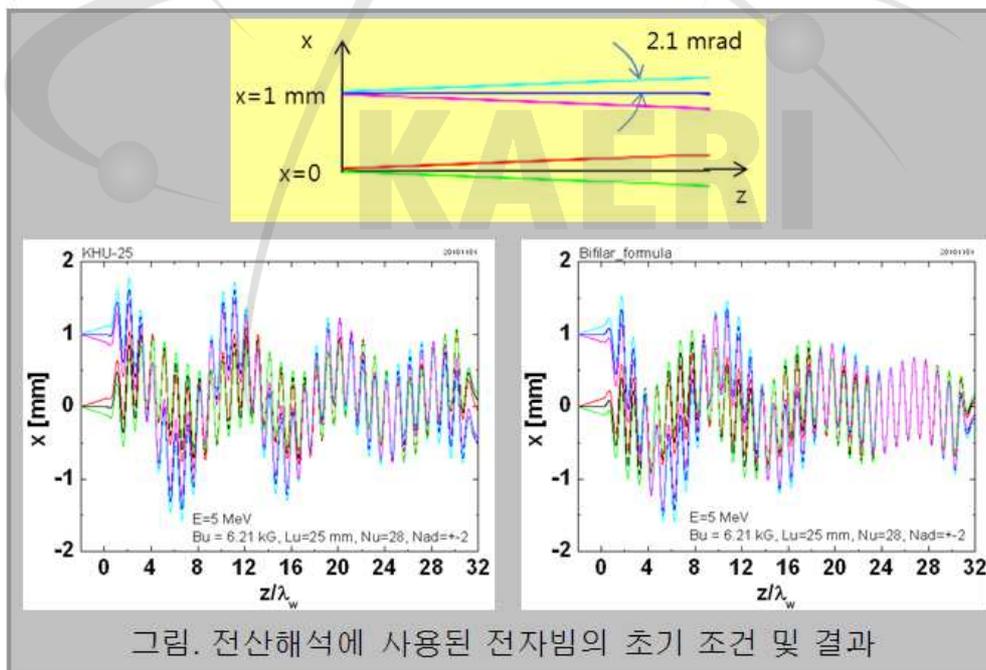
전산해석을 통하여 설계된 KHU-25 교번자장기와 잘 알려진 나선형 교번자장기인 Bifilar 교번자장기에서의 전자빔의 궤적을 비교하여 성능이 비슷함을 확인하였다.

### ■ 전산해석에 사용된 교번자장기 조건

조건 변수	자기장세기	자기장주기	총주기수	Adiabatic 주기수
값	6.21 kG	25 mm	28	앞뒤 각 2 주기

### ■ 결과 분석

- KHU-25의 경우 단면 방향으로의 이동이 좀 더 크나 전체적인 성능의 거의 유사함



# 나선형 교번 자장기 자기장 성능 분석 - 자발방출스펙트럼 분석

## 주요 내용

전자빔 궤적 전산해석으로 얻어진 결과를 이용하여 KHU-25 교번자장기와 Bifilar 교번자장기에서의 자발방출스펙트럼과 이득곡선을 비교하여 두 교번자장기의 성능이 비슷함을 확인하였다.

- 결과 분석 (첨부-2의 전자 조건에 대한 분석임)
  - 중심 파장이 KHU-25의 경우 약 5  $\mu\text{m}$  짧은 것을 제외하고는 거의 유사한 성능을 가짐.

	KHU-25	Bifilar
발생 중심파장	347 ~ 358 $\mu\text{m}$	352 ~ 362 $\mu\text{m}$
발생 파장 폭	11 $\mu\text{m}$	10 $\mu\text{m}$
세기	차이 0.1% 이내	

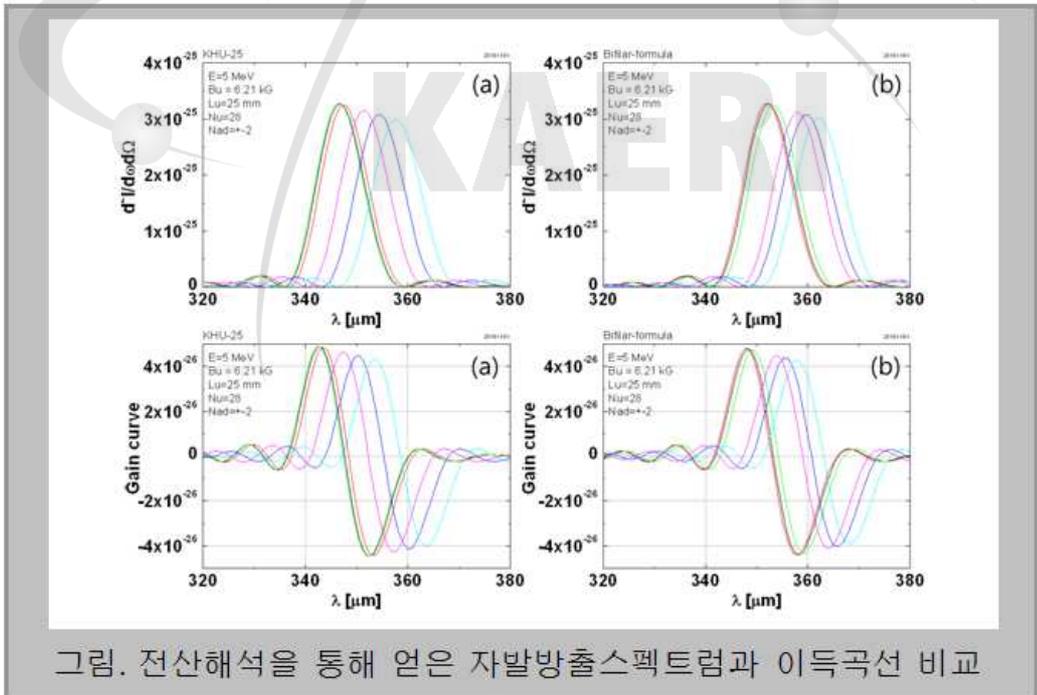


그림. 전산해석을 통해 얻은 자발방출스펙트럼과 이득곡선 비교

# Trajectory simulation 코드를 이용한 전자빔 궤적 확인.

## 주요 내용

전자빔 운동 simulation 코드를 개발하여 Undulator 교번자장기를 통과하는 전자빔의 궤적을 계산하였다.

<교번자장기 조건>

<계산에 사용된 전자빔 조건>

자기장세기	자기장주기	층주기수	Adiabatic 주기수	에너지	emittance	검속위치
0.6 T	25 mm	28	앞뒤 각 3 주기	5 MeV	5 mm mrad	100 mm

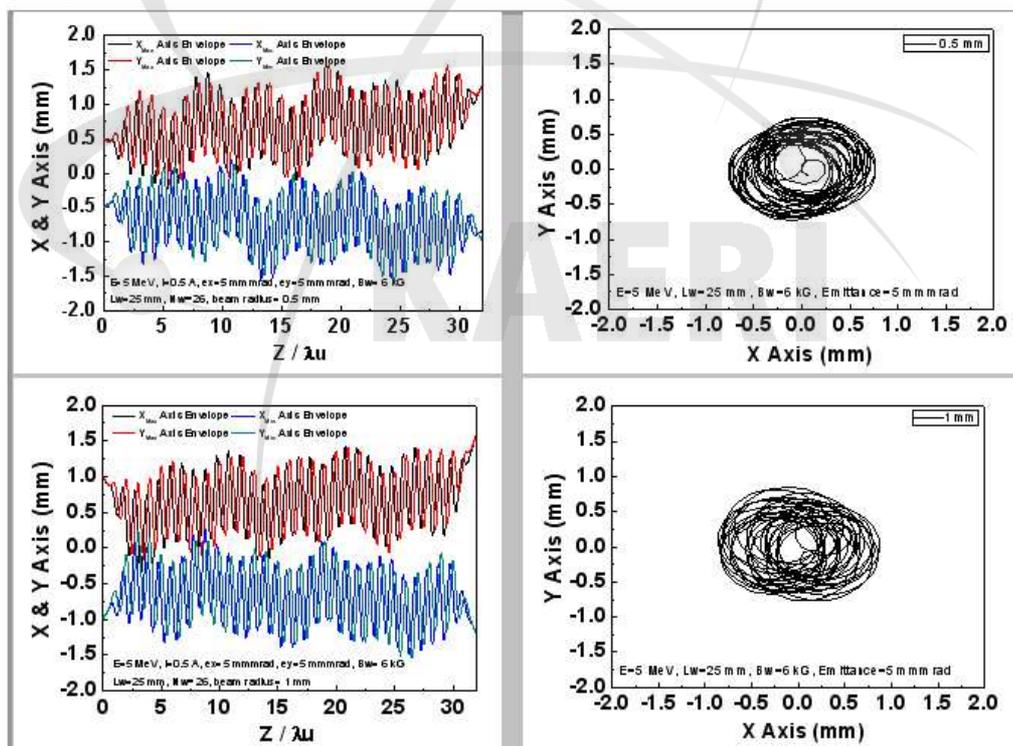


그림1. 자기장 0.6 T 일 때 빔반경 0.5 mm, 1 mm에 대한 전자의 궤적.

## Undulator를 입사하는 전자빔의 최적 조건

### 주요 내용

전자빔 궤적 계산을 통하여 전자빔들이 도파관의 벽에 부딪치지 않고 도파관을 무사히 빠져나갈 수 있는 조건을 구하였다.

#### ■ 자기장의 세기와 빔집속 위치에 따른 분석

- Adiabatic: 3, 빔 집속 위치: 100 mm,  
자기장 세기: 0.4 T- 0.7 T,  
위의 조건에서 전자빔의 반경이 1 mm 이하이면  
전자빔의 undulator 투과율이 100%.



빔집속위치 자기장	50 mm	100 mm	150 mm	200 mm
0.4 T	0.75 mm	1.5 mm*	1.5 mm*	1.5 mm*
0.5 T	1 mm	1.5 mm*	1.5 mm*	1.5 mm*
0.6 T	1 mm	1.25 mm	1.25 mm	1.25 mm
0.7 T	1 mm	1 mm	1 mm	1 mm

표 1. 전자빔이 100% 투과하기 위한 최대 전자빔 반경  
(전자빔의 반경이 1.5 mm 인 경우는 최대 반경이 더 클 수 있음)

## 원형 도파관 모드 해석 및 손실 계산(1)

### 주요 내용

THz 발진 공진기로 원형 도파관이 고려됨. 상온에서 도파관이 좋은 전도체라고 가정하고 열 손실은 계산. 계산 결과에 따르면 상온에서 TE<sub>11</sub> mode의 손실은 약 20%정도임 (단, 원형 도파관의 반경은 2.4 mm).

#### ■ 감쇠 상수 ( $\alpha$ ) 의 정의

$$P = P_0 e^{-2\alpha} \cong P_0 (1 - 2\alpha)$$

#### ■ $P_0$ 및 $P$

$$P_0 = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \int_s E \times H^* \cdot ds$$

$$P_i = \frac{R_s}{2} \operatorname{Re} \int_s |J_s|^2 \cdot dl = \frac{R_s}{2} \int_s |H_t|^2 \cdot dl$$

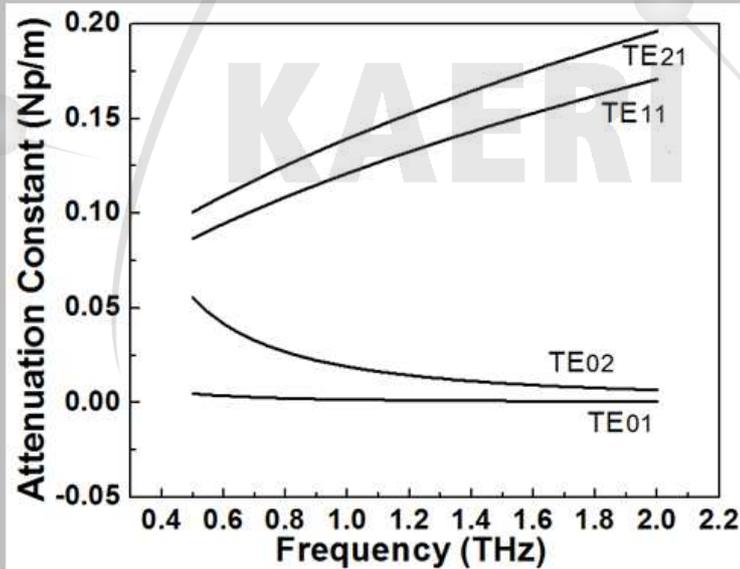


그림. 원형 도파관의 모드 별(TE mode) 손실 계수(반경2.4 mm)

## 저온에서의 원형 도파관 손실 계산(2)

### 주요 내용

저온 상태에서는 penetration depth가 늘어나고 mean free path가 줄어들게 되어, 금속표면에서 손실은 작아지게 되는데, 이것은 anomalous skin effect라 알려져 있다. 이런 효과를 고려하면, 손실은 단위 길이 당(m) 10%정도까지 줄일 수 있다.

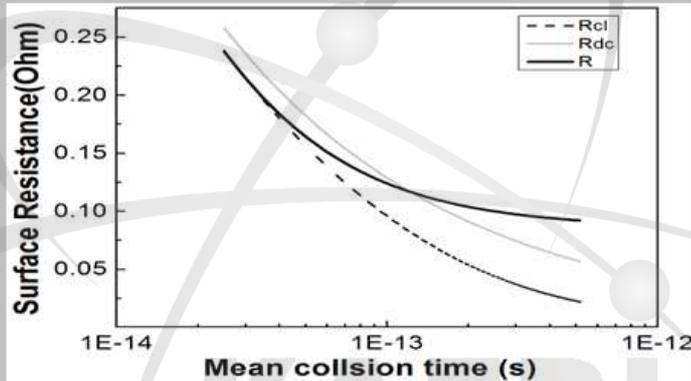


그림. Collision time과 표면저항의 관계

	displacement current term $\frac{\omega^2 \tau^2}{c^2}$	relaxation effect term $\omega \tau$	anomalous skin effect term $\frac{l}{\delta}$	surface resistance R	$ \epsilon  = \frac{3}{4} V_f^2 \mu \frac{n e^2}{m} \omega \tau^3$ $(1 + (\omega \mu g a \tau)^2)^2$
$R_{dc}$	x	x	x	$\sqrt{\frac{\mu m \omega}{2 n e^2 \tau}}$	$\epsilon  < 1$
$R_{cl}$	x	o	x	$\sqrt{\frac{\mu m \omega}{2 n e^2 \tau} \sqrt{-\omega \tau + \sqrt{1 + \omega^2 \tau^2}}}$	
$R_{cl2}$	o	o	x	$Re \frac{\mu \omega V_f \tau}{\sqrt{\frac{\omega^2 V_f^2 \tau^2}{c^2} - \frac{i V_f^2 \mu n e^2 \omega \tau^3}{m(1 + i \omega \tau)}}}$	
R	x	o	o	$\frac{2}{\pi} \mu V_f \omega \tau \frac{\omega \tau Re(I) - Im(I)}{1 + \omega^2 \tau^2}$ where $I = \int_0^\infty \frac{dt}{t^2 + \frac{\frac{3}{4} V_f^2 \mu \frac{n e^2}{m} \omega \tau^3}{(1 + i \omega \tau)^2} - k(t)}$ $k(t) = \frac{2}{t^3} ((1 + t^2) \arctan(t) - t)$	$\epsilon  \approx 1$ or   $\epsilon  > 1$

그림. 고려 조건 별 표면저항

# 내부가 절연 물질로 코팅된 원형 도파관에서의 손실(3)

## 주요 내용

원형 도파관 내부에 dielectric 물질을 코팅하게 되면, hybrid mode가 나타나게 되며 손실은 줄어 들게 된다. 코팅을 한 겹만 했을 때 손실이 최소가 되는 코팅 두께와 그에 따른 손실 계수를 계산 하였다. 반경 2.4mm의 원형 도파관 내벽에 40  $\mu\text{m}$ 의 polyethylene( $\epsilon=1.5$ )을 코팅할 경우 1 THz에서 손실을 2%까지 줄일 수 있을 것으로 예상된다.

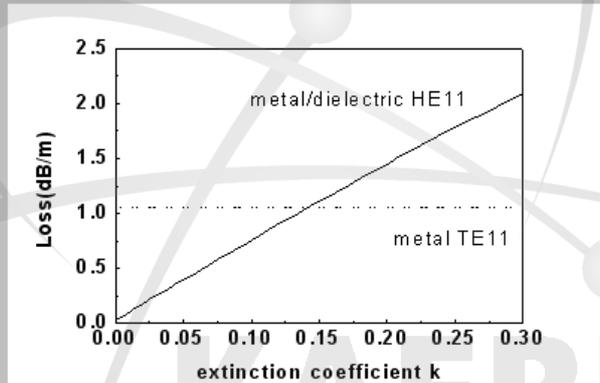


그림. 1THz에서 metal/dielectric HE<sub>11</sub> 및 metal TE<sub>11</sub> loss

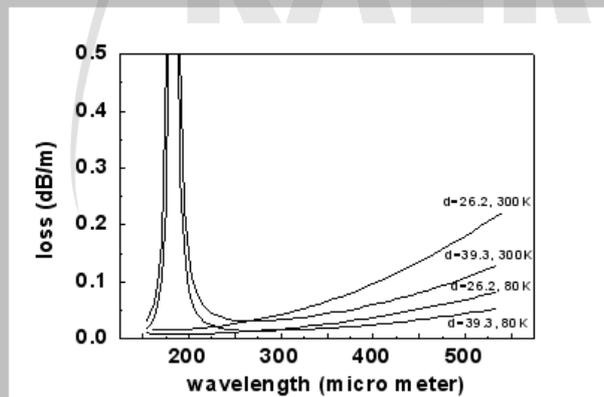


그림. 온도 및 coating 두께에 따른 HE<sub>11</sub> mode loss

# 공진기 거울의 반사/투과 특성 조사

## 주요 내용

정사각형의 금속 격자를 도파관 중간에 넣어 적절한 반사율을 확보하는 동시에 전자빔은 잘 통과하도록 FDTD(Finite Difference Time Domain) 시뮬레이션 코드를 이용하여 1 THz에서 반사율 80%인 금속 격자 거울을 디자인 했다. (격자주기 : 100  $\mu\text{m}$ , 두께 : 10  $\mu\text{m}$ , Transparency: 0.84)

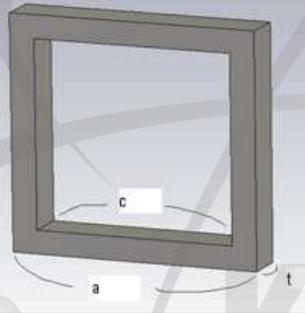


그림. 정사각형 격자의 변수

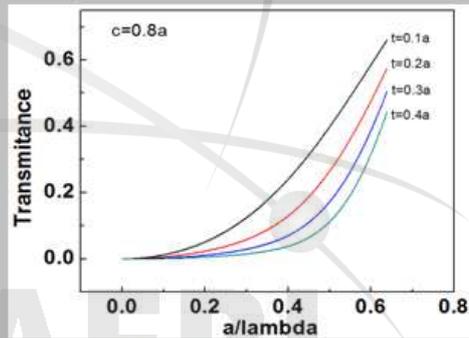


그림. 금속 두께 변화에 따른 투과율 경향

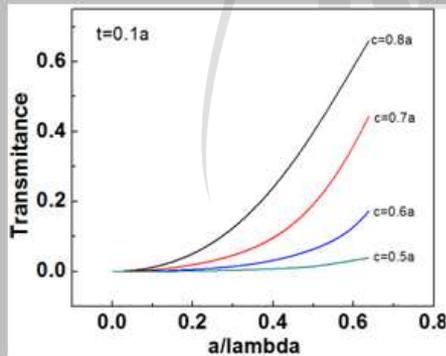


그림. 실두께 변화에 따른 투과율 경향(1)

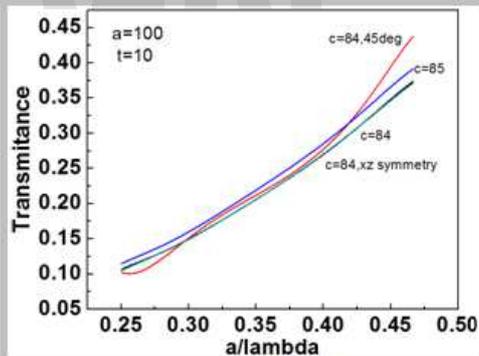


그림. 금속 두께 변화에 따른 투과율 경향(2)

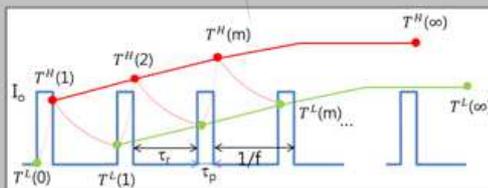
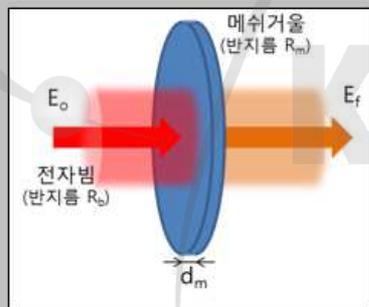
## 공진기 거울 열 특성 분석

### 주요 내용

전자빔이 얇은 두께의 금속필름으로 이루어진 공진기 거울을 투과하면서 발생시키는 열 문제를 해석학적으로 분석하여, 열전도도가 좋은 알루미늄이 가장 적합한 재료라는 결론을 얻었다.

■ 금속 필름의 재질에 따른 최종 도달 온도  
(거울의 지름이 4 mm 인 경우)

재질	Al (13)	Ti (22)	Ni (28)	Cu (29)	Ag (47)	Ta (73)	W (74)
$\Delta T^H$ [°C]	45.6	293.7	175.3	97.8	158.4	534.3	343.7
$\Delta T^L$ [°C]	5.3	227.1	93.9	7.5	5.5	274.7	68.2



변수	기호	값
에너지	$E_o$ [MeV]	5.5
전류	$I_o$ [mA]	60
펄스폭	$t_p$ [ms]	5.5
지름	$D_b$ [mm]	2
반복율	$f$ [Hz]	100

	$\Delta E$ [keV] [%]	펄스당 발생 열에너지 [mJ]
Al (13)	4.6 (0.084)	1.5
Ti (22)	7.5 (0.14)	2.5
Ni (28)	15.3 (0.28)	5.0
Cu (29)	14.0 (0.25)	4.6
Ag (47)	17.9 (0.33)	5.9
Ta (73)	28.8 (0.52)	9.5
W (74)	33.3 (0.61)	11.0

그림. 공진기 거울 열분석에 사용

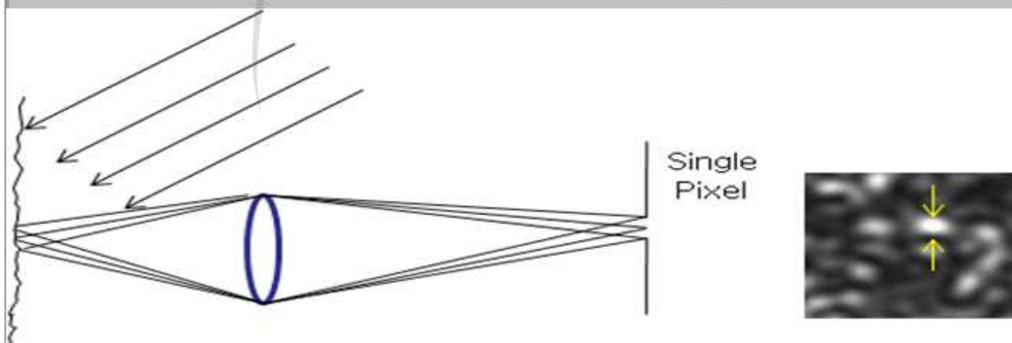
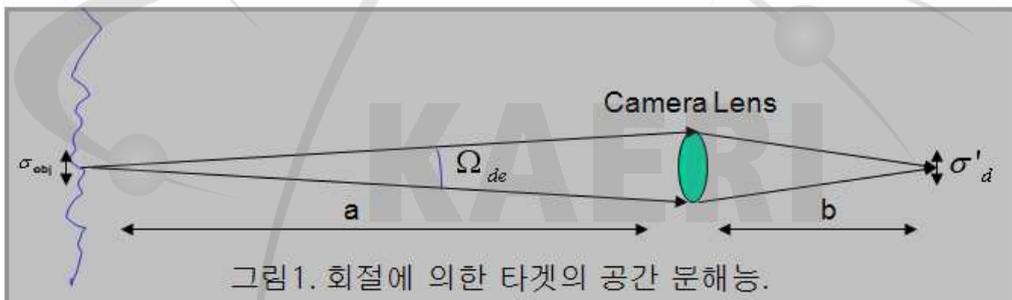
# 스펙클 저감을 위한 조사장치의 개념설계

## 주요 내용

물체의 각 지점에서 산란된 빛의 위상을 임의로 (Randomly) 조절하면 하나의 픽셀에서 얻어지는  $N = \sigma_{obj} / D_{pro}$  배율만큼 스펙클 효과 저감.

빛의 강도 :  $I = \left| \sum_i E_i \right|^2$   
 $I = \left( \frac{\sigma_{obj}}{\sigma_{pro}} \right) \sum_i |E_i|^2$   
 조명된 빛의 크기 :  $D_{pro}$

물체의 공간분해능  
 $\sigma_{obj} = 1.22\lambda / \Omega_c$   
 $\Omega_c$  : 카메라 렌즈의 고체각



## 아르마르 필터를 이용한 스펙클 저감법

### 주요 내용

아다마르 필터는 64개의 작은 세부 셀로 이루어져 있으며 이 경우 스펙클 저감을 8배 높일 수 있다.

물체에서의 빛의 크기 :  $\sigma_{spot}$

집광렌즈의 직경 :  $D_{pro}$

조점거리 :  $f_{pro}$

크기 :  $\sigma_{spot} = 1.2 f_{pro} \lambda / D_{pro} = 1.2 \lambda / \Omega_p$

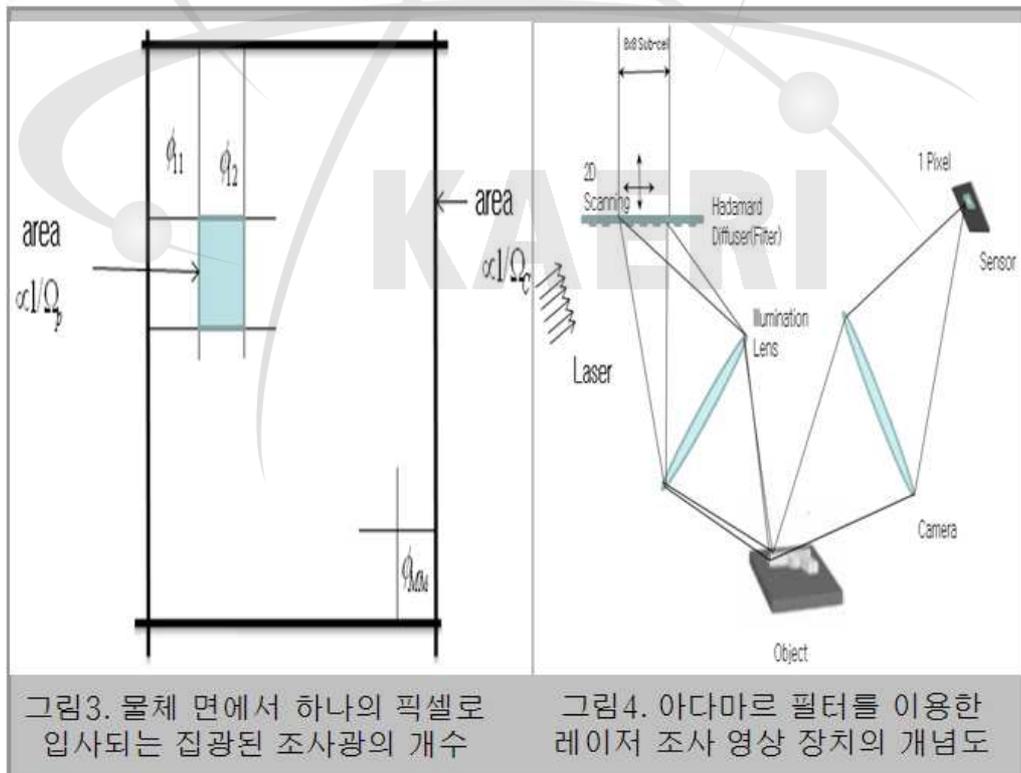


그림3. 물체 면에서 하나의 픽셀로 입사되는 집광된 조사광의 개수

그림4. 아다마르 필터를 이용한 레이저 조사 영상 장치의 개념도

## 아르마르 필터를 이용한 스펙클 저감법

laser wavelength ( $\mu m$ )	Object Resolution (mm)	Camera Lens의 Solid Angle( $\Omega_c$ )	집광 Lens의 Solid Angle( $\Omega_p$ )	Speckle Reduction factor ( $\eta$ )	가능성	
200	2 mm	0.12	0.12	$1/\sqrt{2}$	○	
			0.24	$1/(\sqrt{2} \times 2)$	○	
			0.36	$1/(\sqrt{2} \times 3)$	△	
	4 mm	0.06	0.06	$1/\sqrt{2}$	○	
			0.12	$1/2$	○	
			0.24	$1/(\sqrt{2} \times 4)$	○	
	5 mm	0.048	0.3	$1/(\sqrt{2} \times 5)$	○	
			0.048	$1/\sqrt{2}$	○	
			0.096	$1/(\sqrt{2} \times 2)$	○	
300	2 mm	0.18	0.18	$1/\sqrt{2}$	○	
			0.36	$1/(\sqrt{2} \times 2)$	△	
			0.54	$1/(\sqrt{2} \times 3)$	×	
	4 mm	0.09	0.09	$1/\sqrt{2}$	○	
			0.18	$1/(\sqrt{2} \times 2)$	○	
			0.36	$1/(\sqrt{2} \times 3)$	△	
	5 mm	0.072	0.072	$1/\sqrt{2}$	○	
			0.144	$1/(\sqrt{2} \times 2)$	○	
			0.288	$1/(\sqrt{2} \times 4)$	○	
500	2 mm	0.3	0.3	$1/\sqrt{2}$	△	
			0.6	$1/(\sqrt{2} \times 2)$	×	
	4 mm	0.15	0.15	$1/\sqrt{2}$	○	
			0.3	$1/(\sqrt{2} \times 2)$	○	
	5 mm	0.12	0.45	$1/(\sqrt{2} \times 3)$	×	
			0.12	$1/\sqrt{2}$	○	
			0.24	$1/(\sqrt{2} \times 2)$	○	
				0.36	$1/(\sqrt{2} \times 3)$	△

## 고감도 테라헤르츠 측정기 기술 분석

### 주요 내용

바나듐 옥사이드 계열의 2차원 마이크로볼토미터 테라헤르츠 측정기의 감도 및 편광특성 측정

#### ■ 러시아 BINP와 공동연구 수행

- 세계 최대 출력의 러시아 부드러운물리연구소(BINP)의 NOVOFEL을 활용하여 2차원 계측기의 테라헤르츠 측정감도와 편광특성 등을 측정하고 분석함.
- 측정감도 :  $1 \text{ mW/cm}^2$  이하



그림1. 테라헤르츠 2차원 측정기 분석 실험장치.

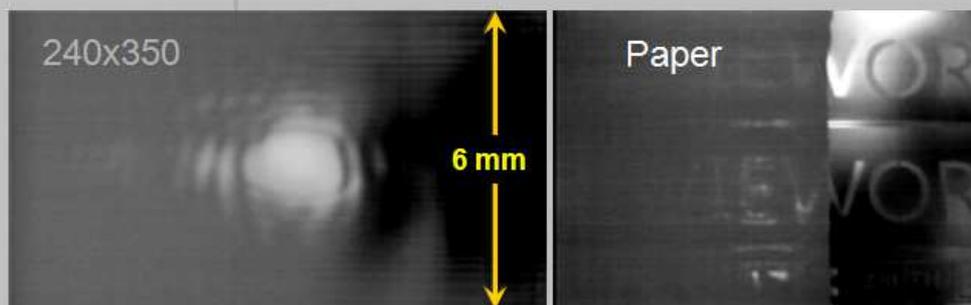


그림2. 테라헤르츠 레이저빔 집속영상(좌) 및 패턴영상 측정 결과.

서 지 정 보 양 식

<b>수행기관보고서번호</b>	위탁기관보고서번호	표준보고서번호	INIS 주제코드
KAERI/RR-3370/2010			
제목 / 부제			
<b>고출력 테라헤르츠 기술 개발</b>			
연구책임자 및 부서명	정영욱 / 양자빔기반방사선연구센터		
연구자 및 부서명	박성희,이기태,차병현,박승규,장규하,최화림,김경남,선우정혜,문정호,김하나,장진석,박선정,임정란 / 양자빔기반방사선연구센터		
출 판 지	대전	발행기관	한국원자력연구원
발행년	2010		
페 이 지	57 p.	도 표	있음( O ), 없음( )
크 기	19x26 cm.		
참고사항			
공개여부	공개(O), 비공개( )	보고서종류	연구보고서
비밀여부	대외비( ), _ 급비밀		
연구위탁기관		계약 번호	
초록 (15-20줄내외)	<p style="text-align: center; font-size: 2em; opacity: 0.3;">KAERI</p> <p>소형 고출력 테라헤르츠 발생장치 설계 및 고속 영상 장치 기반 기술 개발</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 5 MeV급 소형 마이크로트론 simulation 및 설계</li> <li>- 마이크로트론용 고정밀 전자석 설계 및 제작</li> <li>- 전자빔 광학계 시뮬레이션 및 최적 교번자장기 (undulator) 입사 조건 확립</li> <li>- 영구자석 사중극 집속 자석 설계 및 제작</li> <li>- 가속기 차폐를 위한 방사선 평가 및 차폐체 설계</li> <li>- 나선형 교번자장기 자기장 구조 해석 및 최적화</li> <li>- 저손실 테라헤르츠 원형도파관 공진기 설계</li> <li>- 공진기 거울 설계 및 반사/투과 특성 조사</li> <li>- 테라헤르츠 원격조사장치 개념설계</li> </ul>		
주제명키워드 (10단어내외)	고출력 테라헤르츠파, 보안검색, 주기가변교번자장기, 저손실도파관, 마이크로트론 가속기		

BIBLIOGRAPHIC INFORMATION SHEET

<b>Performing Org. Report No.</b>	Sponsoring Org. Report No.	Standard Report No.	INIS Subject Code
KAERI/RR-3370/2010			
Title / Subtitle			
Development of High-power Terahertz Technology			
Project Manager and Department		Young Uk Jeong / Center for Quantum-Beam based Radiation Research	
Researcher and Department		Seong Hee Park, Kitae Lee, Byung Heon Cha, Seungkyu Park, Kyuha Jang, Hwa-Lim Choi, Kyung-Nam Kim, Junghye Seon Woo, Jungcho Mun, Ha-Na Kim, Junsuk Jang, Sunjeong Park, Jungran Lim / Center for Quantum-Beam based Radiation Research	
Publication Place	Daejeon	Publisher	KAERI
			Publication Date
			2010
Page	57 p.	Ill. & Tab.	Yes( O ), No ( )
			Size
			19x25 cm.
Note			
Open	Open(O), Closed ( )		Report Type
Classified	Restricted( ), ___Class Document		
			Research Report
Sponsoring Org.		Contract No.	
Abstract (15-20 Lines)			
<p>Design of compact high power THz wave source and development of high speed imaging technology</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Simulation and design fo 5 MeV compact microtron</li> <li>- Design and fabrication of high precision electromagnet for microtron</li> <li>- Simulation of electron beam optics and establishment of optimal electron beam injection condition into undulator</li> <li>- Design and fabrication of permanent magnet based quadrupole magnet for focusing optics</li> <li>- Evaluation of radiation dose for radiation shielding and design of shielding block</li> <li>- Structural analysis and optimization of magnetic field distributions for helical variable-period undulator</li> <li>- Design of low-loss THz wave circular waveguide cavity</li> <li>- Design of cavity mirror and investigation of its optical characteristics</li> <li>- Conceptual design of THz wave remote irradiation system</li> </ul>			
Subject Keywords (About 10 words)		High power THz wave, Security Inspection, Variable-period undulator, Low-loss waveguide, Microtron-accelerator	