

# 중입자치료센터의 장비 및 공간 구성에 관한 연구

## A Study on Equipment and Space Composition of Heavy Ion Therapy Center

홍창표\* Hong, chang pyo

### Abstract

**Purpose:** The purpose of this study is to provide basic information for the establishment of a Heavy Ion Therapy center by analyzing the cases of Heavy Ion Therapy devices, introducing the equipment and space composition of Heavy Ion Therapy equipments. **Methods:** This study is carried out by study the Heavy Ion Therapy, by figure out status of the installation of treatment centers around the world and by analyze the composition of Heavy Ion Therapy equipments and spaces through case studies. **Results:** The results of this study, which investigated the treatment of Heavy Ion Therapy and analyzed the plans of the five Heavy Ion Therapy centers, are summarized as follows. 1) Heavy Ion equipment requires a significant floor area. Vertical as well, many cross-sectional areas need to be secured for the construction of a delivery system. The Heavy Ion Therapy device should be built as a shielded wall because of the radiation leaking. Therefore, it is necessary to consist of a independent treatment center. 2) The size of Heavy Ion devices is getting smaller. Linac can be put into synchrotron. and the size of synchrotron, delivery system, and rotating-gantry is getting smaller. 3) Japan is often installed for treatment, and control rooms are integrated, while Europe has secured research space and each control room is separated. **Implications:** People are not familiar with the Heavy Ion Therapy. And the effectiveness of the treatment is not well promoted yet. Hopefully, more attention will be paid to the research involved in the Heavy Ion Therapy.

주제어: 중입자 치료, 입자 치료, 중입자 가속기

Keywords: Heavy Ion Therapy, Ion Therapy, Synchrotron

## 1. 서론

### 1.1 배경 및 목적

암 치료에 방사선을 사용하는 것은 1800년대부터이다. 점점 기술이 개발되어 최근에는 중입자 치료가 도입되고 있다. 그동안 치료에 사용했던 엑스선이나 감마선은 암세포뿐만 아니라 정상 세포에도 해를 주지만, 중입자는 정상 세포에 미치는 영향을 최소화할 수 있다. 주치의 판단에 따라 통원치료가 가능하고 치료 후 바로 정상적인 사회활동을 할 수도 있다. 이렇게 중입자 치료는 수술도 입원도 고통도 없는 첨단 암 치료법이다.

다만 도입에 최첨단 기술이 요구되고, 막대한 투자비가 들어가기 때문에 일부 선진국(일본, 독일, 중국 등)에서만 그 치료 혜택을 받아온 실정이다.

정부 주도로 쌓은 기술력을 바탕으로 이제는 기업들이 개발에 성공하여 중입자 치료 장비를 판매하고 있다. 최근 우리나라

에서도 연세대학교 의료원과 서울대학교 병원에서 연달아 중입자 치료기를 도입하는 것으로 결정해 중입자 치료에 대한 관심과 기대가 높아지고 있다.

본 연구의 목적은 중입자 치료센터의 시공 사례들을 분석하여 중입자 치료 장비의 장비 및 공간 구성에 대하여 살펴보고, 어떤 특성을 가지고 있는가를 분석하여 중입자 치료센터의 건립을 위한 기본적인 정보를 제공하는 데 있다.

### 1.2 연구방법

본 연구에서는 중입자 치료의 개념의 이해하고, 전 세계 중입자 치료기 설치 현황을 파악하고, 몇 개의 중입자치료센터의 장비 구성 및 평면을 분석하여, 장비 구성과 공간의 구성을 분석하는 연구이다. 연구의 방법은 다음과 같다.

제1장에서는 연구의 목적 및 범위와 방법을 고찰해 보고자 한다. 제2장에서는 중입자치료기의 치료 개념에 대하여 설명하고, 제3장에서는 중입자치료기의 전 세계 설치 현황에 대해서

\* 회원, 건축기획파트장, 연세대학교 의료원 (주저자 : siin03@yuhs.ac)

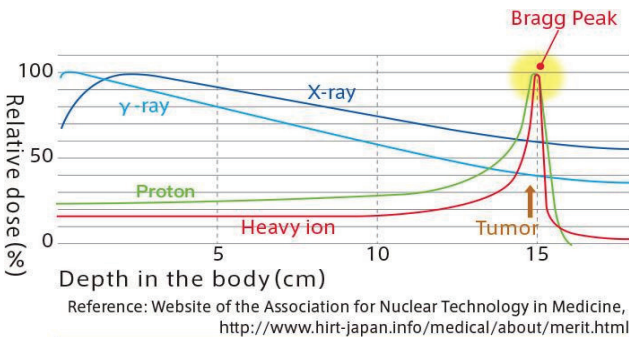
알아본다. 제4장에서는 중입자 장비에 대해서 알아보고, 제5장에서는 중입자치료센터의 평면을 분석한다.

## 2. 중입자 치료의 이해

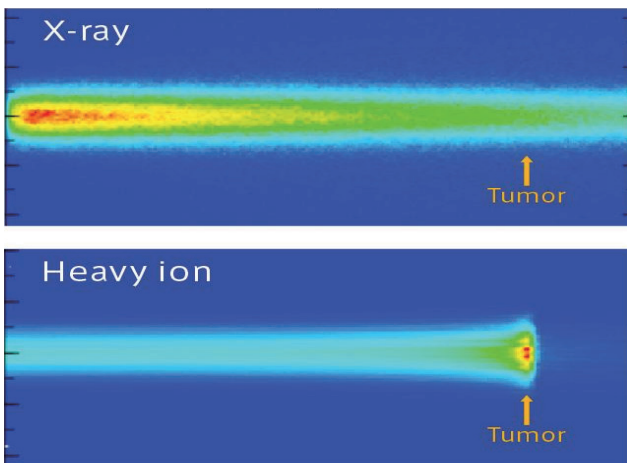
### 2.1 입자 치료

방사선(Radiation)이란 '에너지를 함유한 파동 또는 입자가 공기나 매개체로 전달되는 과정'으로 정의할 수 있다. 이 방사선을 가속하여 강력한 에너지를 암세포에 전달, 암세포를 죽이는 치료법을 방사선 치료라고 한다.

이 방사선 치료는 1895년 뢰트겐(Röntgen)이 X-선을 발견하면서 시작되었다. 이후 여러 의학자 및 연구자들에 의해 방사선이 암 치료에 사용되어 왔다. 초기에는 방사성동위원소에서 나오는 자연 방사선을 이용하다가 1950년대에 최초의 선형가속기(linear accelerator)가 개발되면서 인공적으로 가속하여 얻어진 방사선이 암 치료에 이용되었다. 이후 전산화 단층촬영(CT)이 도입되면서 치료기술 발전에 획기적인 변화가 이루어졌고, 최근에 와서는 기술이 급속도로 발전하면서 입자(Particle radiation) 치료가 진행되고 있다.



[그림1] 방사선 종류별 체내 선량 그래프  
(<https://www.osaka-himak.or.jp/en/whats/merit/>)



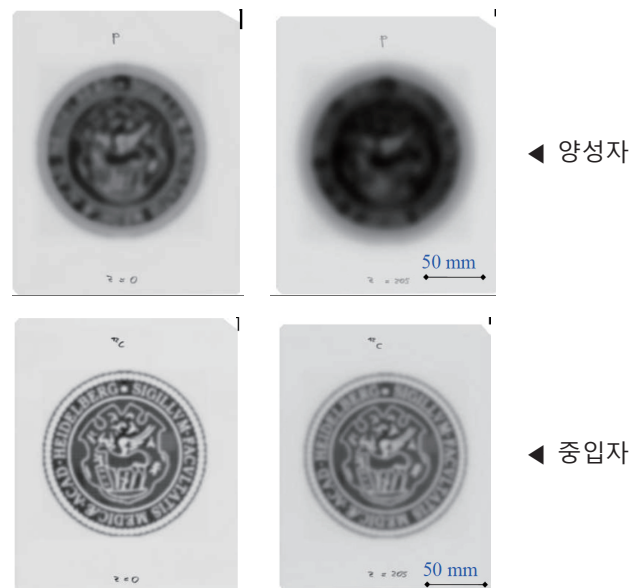
[그림2] 체내 방사선 선량 비교  
(<https://www.osaka-himak.or.jp/en/whats/merit/>)

입자 치료가 더 진보한 치료방식인 이유는 브레그 피크(Bragg Peak)라는 특징 때문이다. 기존에 방사선 치료에 사용된 엑스선과 감마선은 암세포를 향해 강하게 쏘아도 피부를 뚫고 체내로 들어가면서 그 살상 능력이 현저하게 줄어든다. 그러나 입자선은 몸의 표면에서는 방사선량이 적지만 몸 속 암조직에 도달하면 방사선량이 최대가 되었다가 사라진다. 이러한 특징 때문에 정상세포에 미치는 영향을 최소화하여 부작용을 최소화 할 수 있다.

### 2.2 중입자 치료

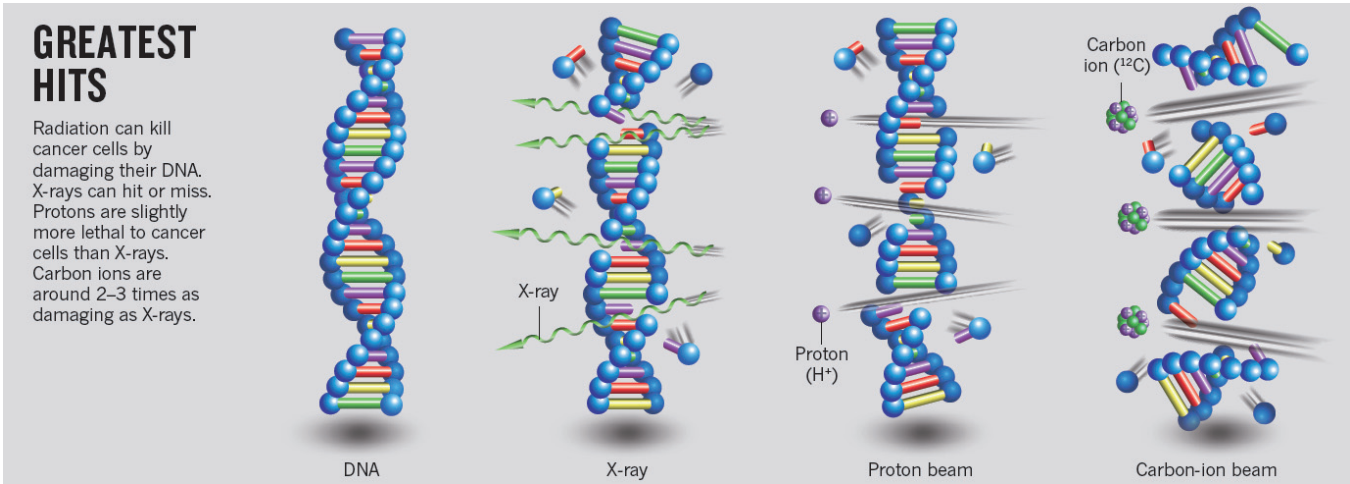
입자 치료에는 수소(H) 이온을 활용한 양성자 치료와 수소보다 무거운 중입자 치료로 나뉜다. 중입자에는 탄소(C), 네온(Ne), 실리콘(Si), 아르곤(Ar) 등이 있다.

이 중 암 치료를 위해서는 중입자 중 암세포 살상능력이 가장 뛰어난 탄소를 이용한다. 탄소의 뛰어난 살상능력은 무게에 기인한다. 탄소 이온은 수소에 비해서 12배가 무겁기 때문에 훨씬 큰 에너지를 전달할 수 있다. 또한 더욱 정교하다. 입자를 쏘서 몸속에 그림을 그린다고 가정하면 양성자는 그림의 경계가 흐릿하게 그려지는 반면 중입자는 보다 선명하게 그림을 그릴 수 있다. 양성자는 경계에서 산란이 일어나는 반면 중입자가 무게 때문에 산란 현상이 적기 때문이다. 중입자는 양성자 치료에 비해 치료 횟수를 줄일 수 있다.



[그림 3] 양성자와 중입자로 그린 그림  
(AAPM 55, August 2013)

중입자 치료가 충분한 살상력을 얻기 위해서는 빛의 속도의 약 70~80%까지 탄소입자를 가속시켜야 하고, 정확하게 암세포를 타격하여야 한다. 가속된 탄소 입자는 처방된 치료 방사선량으로 종양을 3차원으로 "페인트"하기 위해 약 2,500mm의 거리에서 1mm 미만의 정밀도로 수직 및 수평으로 조정되어야만 한다.



[그림 4] 방사선 종류별 암세포 제거 효과 (Vivien Marx, 2014, "Sharp Shooter", Nature, April 2014)

충분한 임상 데이터를 바탕으로 중입자 치료는 이미 치료 효과가 입증되었다. 한 번에 암세포를 효율적으로 파괴시킬 수 있기 때문에 정상세포의 손상을 줄여 부작용을 최소화할 수 있다. 암세포 밑에 숨어있는 저산소 세포(산소 공급이 원활하지 않아 산소가 결핍된 세포로 암의 원인으로 알려져 있다.)도 함께 없앨 수 있어 치료 후 암세포의 재발도 효과적으로 막을 수 있는 것으로 알려졌다.

### 3. 중입자 치료기 설치현황

#### 3.1 중입자 치료의 역사

역사적으로 중입자 치료는 1957년 미국의 로렌스 버클리 국립 연구소(The Lawrence Berkeley National Laboratory)에서 처음 수행되었다. 이온은 헬륨을 사용하였고 433명의 환자가 치료를 받았다. 이어서 1975년부터는 네온 이온을 이용하여 2,000여 명의 환자를 치료하다, 1992년 중입자 가속기(Bevalac)가 폐쇄되면서 이 연구소의 치료 프로그램은 중단되었다.

로렌스 버클리 국립연구소에서 활약하던 일본 연구원들이 자국으로 돌아와 중입자 치료에 대한 연구를 계속하여, 1994년 국립 방사선과학 연구소(The National Institute of Radiological Sciences(NIRS))에서 세계 최초로 의료용 중입자 가속기를 활용하여 중입자 치료를 시작하였다. 이온 소스는 카본을 사용하였다. 일본 치바에 위치한 이 연구소(HIMAC)는 1988년 공사를 시작하여 1993년 완공하였다.

독일의 GSI(GSI Helmholtz Center for Heavy Ion Reserch)에서도 중입자 치료를 준비하여 세계에서 3번째로 중입자 치료를 시작하였다. 1993년 공사를 착수하여 1997년 12월 중입자 치료가 시작되었다. 독일은 일본보다 늦게 시작하였지만 세계 최초로 회전식 겐트리(Gantry) 방식의 치료기를 개발하였다.

이후 이탈리아와 중국, 오스트리아에서도 중입자 치료기를 설치하고 치료 및 연구가 활발하게 진행되고 있다.

#### 3.2 중입자 치료기의 전 세계 설치 현황

전 세계적으로 양성자 치료기는 100여 대 정도가 운영을 하고 있다. 그러나 중입자 치료기는 현재 13대가 전부이다. 더 우수한 치료 효과에도 불구하고 중입자 치료기의 보급이 양성자 치료에 비해서 2배 이상의 비용이 들어가는 것으로 알려져 있다.

또한 고도의 기술력이 필요하기 때문이다. 그동안 중입자 치료기는 국가에서 연구과제로 개발을 주도하여 일부 선진국에서만 장비가 제작되었다. 때로는 여러 국가가 기술을 합쳐서 만들기도 하였다. 예를 들어 오스트리아의 매드 오스트론(Med Austron)의 경우 오스트리아, 독일, 이탈리아, 덴마크, 프랑스뿐만 아니라 러시아의 기술까지도 합쳐서 만들었다.

이제는 국책과제에 참여했던 기업들이 자체적으로 장비를 개발하여 판매하기 때문에 독자적인 기술이 없어도 중입자 치료기를 설치할 수 있게 되었다. 중입자 치료기의 도입은 점차 확대될 예정이다.

우리나라에서는 연세의료원이 2018년 일본의 도시바사와 장비구매 계약을 맺고 2022년 치료 시작을 목표로 서울 신촌에서 공사를 진행하고 있다. 서울대병원도 동일한 장비사와 2020년 장비계약을 하였고, 2024년 치료 시작을 목표로 기장에 설치하는 것을 준비 중이다.

계획대로 2022년 연세의료원에서 중입자 치료를 시작할 경우 우리나라는 2021년 14번째로 치료를 시작할 예정인 대만의 TVGH(Taipei Veterans General Hospital)에 이어서 세계에서 15번째로 중입자 치료기를 운영하는 나라가 된다.

[표 1] 전 세계 운영 중인 중입자 치료센터 현황

No	기관명	지역	국가	운영시작	치료실 수	조사 포트			
						수평	수직	45°	겐트리
1	NIRS	치바	일본	1994	3	2	2	0	1
2	HIMBC	효고	일본	2002	3	2	1	1	0
3	HIT	하이델베르크	독일	2009	3	2	0	0	1
4	GHMC	군마	일본	2010	3	2	2	0	0
5	CANO	파비아	이탈리아	2012	4	3	1	0	0
6	SAGA-HIMAT	도스	일본	2013	3	3	1	0	0
7	SPHIC	상하이	중국	2014	3	1	2	0	0
8	MIT	마르부르크	독일	2015	4	3	0	1	0
9	i-Rock	카나가와	일본	2015	4	2	2	2	0
11	HICTC	우에이	중국	2019	4	4	4	4	0
10	MedAustron	비너노이슈타트	오스트리아	2019	3	2	1	0	0
12	OHITC	오사카	일본	2019	3	3	0	0	0
13		야마가타	일본	2020	2	1	1	0	1

#### 4. 중입자 장비

##### 4.1 중입자 장비 구성

중입자 장비는 개발하는 곳마다 특색을 가지고 있기 때문에 장비의 제원은 연구소마다 다르다. 그러나 장비의 구성은 대부분 동일하다. 중입자 장비가 어떻게 구성되는지 살펴보면 다음과 같다.



[그림 5] 중입자 장비 구성  
(<https://steemit.com/kr-science/@chosungyun/m488n>)

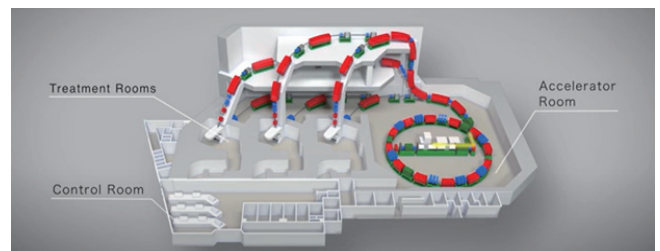
- 1) 이온발생기(Linac) : Low Energy Beam  
이온(탄소 입자)을 생성해서 선형가속기에 넣어 주는 부분이다.
- 2) 라이낙(Linac) : Medium Energy Beam Transport  
Injector에서 발생한 이온을 가속시키는 선형가속기이다. 싱크로트론에서 처음부터 이온을 가속시키기가 어렵기 때문에 선형가속기에서 미리 가속을 하고 이를 입사시키는 방식을 사용한다.

##### 3) 싱크로트론(Synchrotron)

싱크로트론은 고주파 가속 장치와 여러 개의 전자석들이 연결된 링이다. 가속 장치는 전기장을 조정하여 입자를 가속시키고, 전자석들은 이온의 방향을 바꿔서 순환할 수 있도록 한다. 이렇게 함으로써 동일한 궤도를 유지하며 가속을 하게 된다.

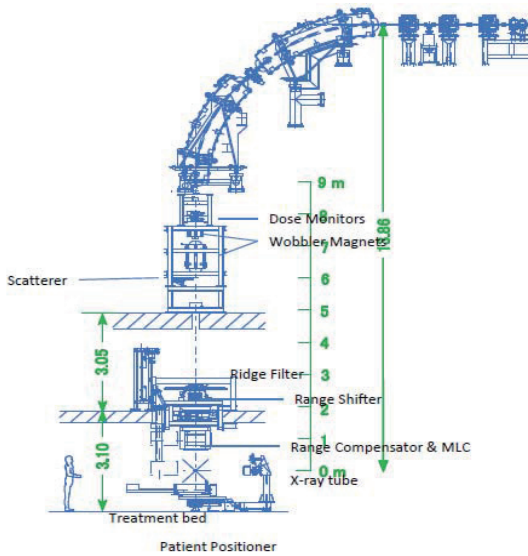
##### 4) 빔라인(Beam Line) : High Energy Beam Transport(HEBT)

가속된 고에너지 이온 빔을 치료실까지 전달하는 장치이다. 빔라인은 치료방법에 따라 고정빔과 회전형 겐트리(Rotating Gantry)로 구분된다. 고정빔은 수평, 수직, 45° 빔으로 나뉘어진다.



[그림 6] 중입자 치료기의 입체 구성(OHITC)  
(<https://www.osaka-himak.or.jp/en/whats/merit>)

기술 발달로 가속기의 지름과 빔라인의 회전반경이 줄어들고 있다. 그러나 아직도 빔라인을 구성하기 위해서는 상당한 단면적을 필요로 한다. 예를 들어 GHMC의 경우 NIRS보다 2m 줄어들었음에도 불구하고 치료대로 부터 수직빔 상부까지 높이가 18.86m이다.



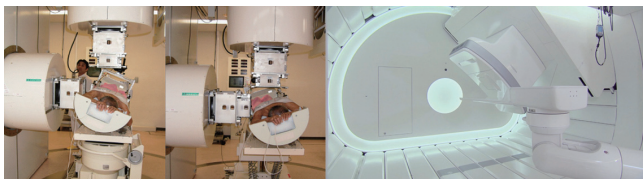
[그림 7] 수직빔 단면구성(GHMC)  
(www.mdpi.com/journal/cancers)

### 5) 치료실(Treatment Area)

치료실은 고정치료실과 회전형 겐트리실로 나누어진다. 고정 치료실은 치료기가 고정되어 있고 환자가 치료 부위 및 치료 계획에 의해서 몸을 돌려서 치료하는 방식이다.

회전형 겐트리실은 환자는 가만히 누워있고, 치료기가 회전하면서 치료 각도를 맞추는 방식이다. 환자 치료에는 훨씬 발전된 형태이다.

중입자용 회전형 겐트리는 2012년 독일의 HIT에서 세계 최초로 개발되었고, 일본에서는 2016년 개발되어 NIRS, 야마가타 등에서 사용 중이다.



[그림 8] 고정치료실(좌측), 회전형 겐트리실(우측) 비교  
(https://accelconf.web.cern.ch/HIAT2015/talks/frm1c01\_talk.pdf)

HIT에 설치된 겐트리는 무게가 600톤에 길이도 약 25m로 상당한 크기로 개발되었다. 이후 NIRS에서는 무게가 300톤 길이가 13.8m, 야마가타의 경우 무게 200톤에 길이 7.8m로 기술이 발전함에 따라 겐트리의 크기가 점차 작아지고 있다.

### 4.2 차폐

중입자 치료기는 입자의 가속 과정과 치료실로 전달하는 과정에 Beam Loss로 감마선이 발생하고, 치료실 내부에서 치료하는 과정에도 방사능이 나오기 때문에 차폐 계산이 매우 중요하다. 일반적으로 몬테카를로 시뮬레이션 툴을 적용한다.

차폐를 시뮬레이션하기 위해서는 장비에서 발생하는 감마선의 유출량뿐만 아니라 일일 환자 치료계획 및 치료실 운영시간 등의 변수를 모두 확인하여 차폐 계산을 하여야 한다.

차폐벽체를 통과하는 방사능량이 10 $\mu$ Sv/week 이하로 조성해야하기 때문에 차폐벽체의 두께가 2m이상으로 두꺼워진다. 차폐 벽체의 상당한 하중 때문에 자연지반 위에 구성하는 것이 유리하다.

## 5. 중입자 치료센터 평면 분석

### 5.1 대상 선정

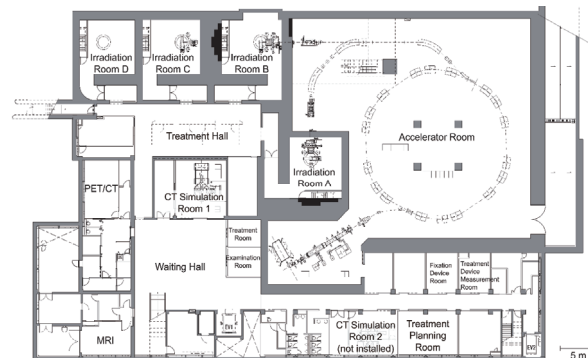
분석 대상은 중입자 치료 분야에서 두각을 나타내고 있는 일본의 치료센터 3곳과 독일, 오스트리아 각 1곳을 선정하였다.

### 5.2 중입자 치료센터 평면 분석

#### 1) GHMC

구분	시설명	GHMC, 2010
	위치	군마, 일본
	연면적	6,280m <sup>2</sup>
	규모	B1~2F, 45m×65m

사진



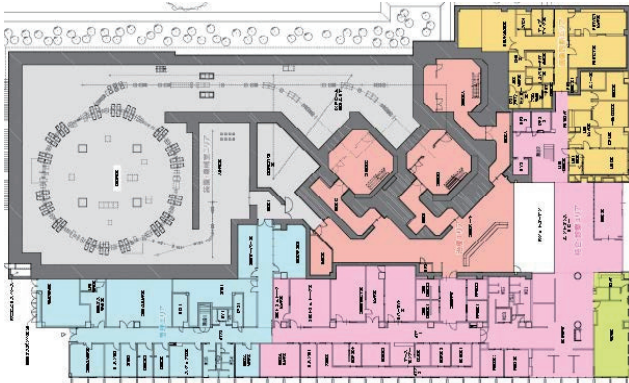
구성

- 이온 생성기와 라이낙이 별도의 방으로 구성되어 있고, 4개의 고정치료실이 구성되어 있다. 가장 좌측의 치료실은 연구용이다. (장비면적 53%)
- 가속기 둘레 : 63.3m
- 조정실은 통합하여 구성하였다.
- 이 층에 CT 시뮬레이터, MRI, PET-CT등 장비실과 치료계획실 등이 배치되어 있다.

2) SAGA-HIMAT

구분	시설명	SAGA-HIMAT, 2013
	위 치	도스, 일본
	연면적	7,490m <sup>2</sup>
	규 모	3F, 54m×90m

사진



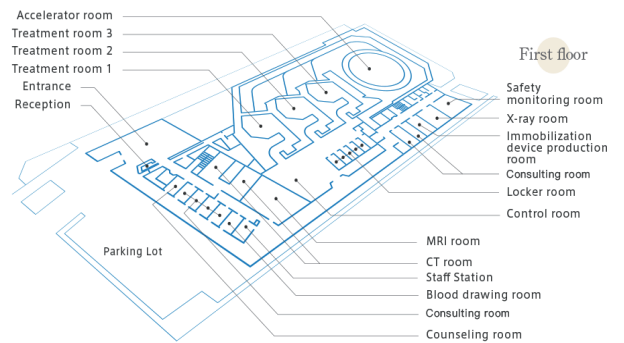
구성

- 직경 20m의 가속기와 별도 공간에 이온생성기와 라이낙이 배치되었고, 3개의 고정치료실로 구성되어 있다. (장비면적 49%)
- 가속기 둘레 : 61.5m
- 조정실은 통합하여 구성하였다.
- 좌측 하단이 지원구역, 가운데 진료구역에 CT simulator, MRI, PET CT 등 장비실과 치료계획실 등이 배치되어 있다. 우측 상단은 검사구역이다.

3) OHITC

구분	시설명	OHITC, 2019
	위 치	오사카, 일본
	연면적	8,849m <sup>2</sup>
	규 모	3F, 건축면적 3,430m <sup>2</sup>

사진



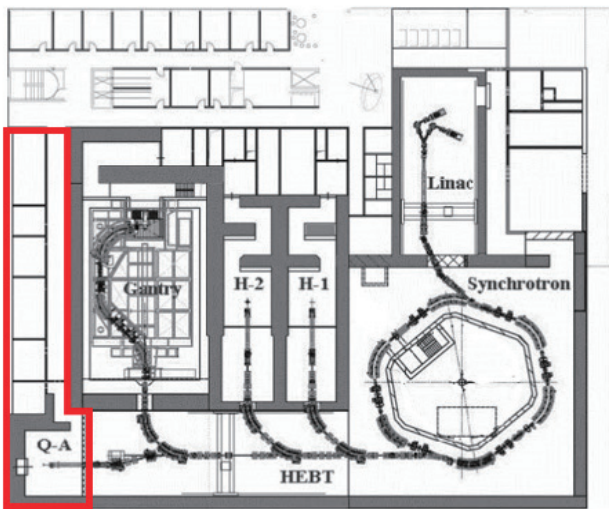
구성

- 이온생성기와 라이낙이 가속기 중간에 배치되고, 3개의 고정치료실로 구성되어 있다.
- 가속기 둘레 : 57m
- 조정실은 통합하여 구성하였다.
- CT 2대, MRI 1대 장비실과 치료 계획실 등이 배치되어 있다.

4) HIT

구분	시설명	HIT, 2009
	위 치	하이델베르그, 독일
	연면적	5,027m <sup>2</sup>
	규 모	B2~1F

사진



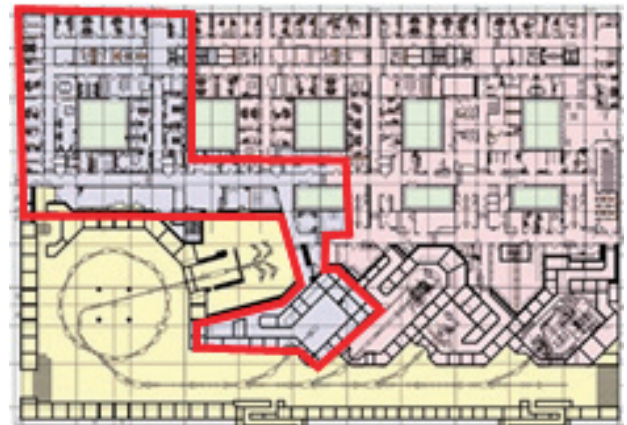
구성

- 이온생성기와 라이낙이 별도의 방으로 구성되어 있고, 2개의 고정치료실과 1개의 회전형 겐트리 치료실로 구성되어 있다. (장비면적 63%)
- 가속기 둘레 : 65m
- 좌측의 작은 연구용 벙커가 있고 그 위로 연구공간이 마련되어 있다.
- 조정실이 통합되어 있지 않고 개별로 구성되어 있다.
- 3개 층으로 구성되어 있어서 이 층에는 CT, MRI 등 진료공간은 없다.

5) Med Austron

구분	시설명	Med Austron, 2019
	위 치	비너노이슈타트, 오스트리아
	연면적	25,000m <sup>2</sup>
	규 모	137m×90m

사진



구성

- 이온생성기와 라이낙이 별도의 방으로 구성되어 있고, 3개의 고정치료실과 1개의 겐트리(양성자용)로 구성되어 있다.(장비면적 50%)
- 가속기 둘레 : 60m
- 좌측의 연구용 벙커가 있고 좌측 구역은 연구 공간 우측 공간은 진료 공간이다.
- 조정실은 개별로 구성되어 있다.
- 바닥 면적이 넓어 가운데 중정을 만들어 채광 면적을 확보했다

### 5.3 분석 종합

중입자 치료센터는 중입자 장비가 거대하기 때문에 50% 이상의 바닥면적을 장비 공간으로 할애하였다. 장비 공간은 이온을 가속하는 과정에 방사능이 발생하기 때문에 방사능 차폐를 하여 두꺼운 벽으로 조성된다.

기술이 개발되면서 중입자 치료기의 크기가 점차 작아지고 있다. 예를 들어 GHMC의 장비는 NIRS의 장비에 비해서 3분의 1의 크기로 제작되었다. 이온 소스와 라이낙은 별도의 방으로 구획되다 오사카에서는 가속기 중간에 넣어서 공간을 줄이려는 노력이 계속되고 있음을 알 수 있다.

유럽과 일본의 차이점도 살펴볼 수 있다. 일본은 장비의 개소가 많아서 이제는 치료 전용으로 설치되는 추세이고, 장비의 운용도 한 곳에 컨트롤 룸을 집중하여 조정하고 있다.

반면 유럽은 연구용 치료실과 연구공간이 확보되어 있고, 치료실이 별도로 구성되어 있다.

### 6. 결론

본 연구는 최근 암 치료의 새로운 대안으로 떠오르고 있는 중입자 치료에 대해 설명과, 세계의 중입자 장비 도입 현황을 소개하고 국내에서 도입될 예정인 중입자 치료센터에 공사과 맞물려 중입자 치료센터의 장비 및 공간 구성을 알아보기 위해서 수행되었다. 중입자 치료에 대해서 조사하고, 5개의 중입자 치료센터의 도면을 분석한 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 중입자 치료센터는 장비의 규모가 크기로 인해 건물 규모가 상당하다. 사례로 보면 최소 3,000m<sup>2</sup> 이상의 바닥 면적과 고정치료실은 전달 체계 구성을 위해, 겐트리실은 설치 및 상하부 점검을 위해 최소 20m이상의 단면적을 확보하여야 한다. 그리고 가속 시 유출되는 방사능 때문에 2m 이상의 두꺼운 차폐벽체로 구축되어야 한다. 따라서 독립된 건물로 센터로 구성하는 것이 유리하다.

2) 중입자 치료기의 크기는 점점 작아지는 추세이다. 별도 실로 구성되어 있던 라이낙을 가속기 속에 넣기도 하고, 기술 발전으로 가속기나 전달 체계, 겐트리 등의 크기가 점점 작아지고 있기 때문이다.

3) 일본은 치료용으로 설치하는 경우가 많고, 컨트롤 룸이 통합되어 있는 반면, 유럽은 연구용 공간이 확보되어 있고, 컨트롤 룸이 각각 조성되어 있다.

중입자 치료센터는 대규모의 자금이 투입되는 고가의 장비이다. 그만큼 치료 효과를 기대할 수 있다. 그런데 아직 중입자 치료에 대해서 잘 모르는 사람들이 많고 장비의 치료 효능에 대해서 홍보가 잘 안되어 있다. 중입자 치료에 대해서 관련된 연구가 더 활발하게 되기를 희망한다.

### 참고문헌

송용근 외 5명, 2017, "몬테카를로 시뮬레이션을 이용한 중입자 치료실의 선량분포 추정", J. Korean Soc. Radio1., Vol. 11, No. 6, November 2017

A. Kitagawa et al., 2010, "Review on heavy ion radiotherapy facilities and related ion sources", Review of Scientific Instrument

Arniold Pompos et al., 2016, "Heavy Ions in cancer Therapy", JAMA Oncology, December, Vol. 2, No. 2, Numver 12, p. 1539~1540

Juliette Thariat et al., 2013, "Past, present, and future of radiotherapy for the benefit of patients", Nature Reviews Clinical Oncology, January 2013, Vol. 10, P. 52~60

Mitsutaka Kanazawa et al., 2011, "Saga-Himat project for carbon ion radiotherapy", Proceedings of the 8th annual meeting of particle accelerator society of japan, august 2011, p. 162~164

Oliver Jäkel, 2013, "The more important heavy charged particle RT of the future is more likely to be with heavy ions rather than protons", AAPM 55, Indianapolis August 5th

Peter Heeg et al., 2014, Z. Med. Phys. 2004, www.elsevier - deutschland.de/zmedphys

R. Fuchs; P. Emde, 2004, "The Heavy Ion Gantry of The HICAT Facility", Proceeding of EPAC, P. 2550~2552

Tatsuya Ohno et al., 2011, "Carbon Ion Radiotherapy at the Gunma University Heavy Ion Medical Center : New Facility Set-up", Cancers, 26 October 2011, P. 4046~4060

Vivien Marx, 2014, "Sharp Shooter", Nature, April 2014, Vol 508, P. 133~138

Yoshiyuki Iwata et al., 2018, "Development of carbon-Ion Radiotherapy Facilities at NIRS", IEEE Transactions on applied superconductivity, Vol. 28, No. 3, April 2018

YTN, 과학기술 특별기획 "중입자 가속기"  
<https://terms.naver.com/entry.nhn?docId=2098542&cid=51009&categoryId=51009> [네이버 지식백과] 방사선 치료, 오해와 진실 (암 알아야 이긴다, 서울아산병원 암센터)

<https://www.ptcog.ch/index.php/facilities-in-operation>  
[www.osaka-himak.or.jp](http://www.osaka-himak.or.jp)  
[www.saga-himat.jp](http://www.saga-himat.jp)  
[www.heavy-ion.showa.gunma-u.ac.jp](http://www.heavy-ion.showa.gunma-u.ac.jp)  
[www.medastron.at](http://www.medastron.at)  
[www.heidelberg-university-hospital.com](http://www.heidelberg-university-hospital.com)

접수 : 2020년 10월 16일  
1차 심사완료 : 2020년 11월 09일  
게재확정일자 : 2020년 11월 26일  
3인 익명 심사 필