

2024년 춘계학술발표대회 : 일반부문

방사광가속기시설 공간계획에 관한 연구

- 해외사례를 중심으로 -

A Study on Spatial Planning for Synchrotron Radiation Accelerator Facilities

- Focusing on Overseas Cases of Synchrotron Radiation Accelerators -

○ 김기창* 윤동식**
Kim, Ki-Chang Yoon, Dong-Sik

Abstract

With the advent of the Fourth Industrial Revolution, synchrotron facilities have gained increased importance along with the advancement of basic science. In particular, the emergence of the Korea 4th generation multi-purpose synchrotron accelerators has further heightened interest in this field. However, information regarding such facilities remains largely insufficient. Therefore, this study aims to analyze the architectural spaces, layouts, and other characteristics of overseas 3rd and 4th generation synchrotron accelerators. Through this analysis, we seek to enhance understanding of synchrotron planning and contribute to their future development.

키워드 : 방사광가속기, 건축계획, 공간, 동선계획

Keywords : Synchrotron Radiation Accelerator, Architectural Planning, Space, Circulation System

1. 서론

1.1 연구의 목적

거대과학(Big Science)은 기초과학 중 특히 막대한 자본과 인력의 투입이 필요하고 거대한 연구시설물을 요구하는 과학(이원희, 2009)이며 한국 정부는 과학기술정보통신부 내 거대공공연구정책관 조직을 운영하여 우주개발, 지구관측, 핵융합, 대형 입자가속기, 원자력 관련 연구를 거대과학기술개발의 범주로 지원하고 있다. 정부투자의 결과로 과학위성 발사체 발사 성공(2013년), 3세대 방사광가속기 구축(1994년), 양성자가속기 구축(2013년), 핵융합연구장치 구축(2007년), 4세대 방사광가속기 구축(2016년)을 이룩하였다. 또한, 정부는 2010년 의료용 중입자가속기 개발사업, 2011년 중이온가속기 구축 사업을 시작하고, 2020년 현재 수출형 신형연구로, 다목적 방사광가속기 등을 추진하는 등 거대과학에 지속적 투자를 하고 있다.¹⁾

이러한 첨단산업과 기초과학의 발달에 따라 기초·원천 연구개발 경쟁력 강화 필요성에 의해 인프라 확충 요구가 지속해서 제기되었다. 그중에서 산업 제조업의 핵심 경쟁력인 소

재, 부품, 장비 산업 경쟁력 확보 필요성이 부각되면서 이를 위해 방사광가속기의 구축이 제기되었다. 특히, 방사광가속기는 물리학, 화학, 생물학 등 다양한 기초과학 연구뿐만 아니라 신소재 개발, 의료 진단 및 치료, 환경 연구 등의 응용 분야에서도 중요한 역할을 수행하여 제 4차 산업혁명 시대의 국가경쟁력을 확보할 수 있는 핵심 산업이다. 본 연구에서는 미래 국가 경쟁력의 핵심이 될 방사광가속기 시설의 공간계획에 대한 분석을 통해 시설 배치 특징을 도출하여 향후 방사광가속기 시설의 건축계획 연구의 기초자료로 활용될 목적으로 한다.

1.2 연구 방법 및 범위

연구의 범위는 해외 운영 중인 3세대와 4세대 원형 방사광가속기 8곳을 대상으로 분석하였다. 가속기 시설의 종류와 형태, 특징에 대한 조사와 선정된 해외 방사광가속기 시설의 부스터링(booster ring)과 저장링(storage ring)의 형태 차이, 인필드 진입 동선, 프로그램 배치 등 방사광가속기 시설의 전반적인 배치계획에 관하여 분석하고자 한다. 연구의 특성상 국가시설에 대한 조사이므로, 온라인에 공개된 자료를 활용하여 분석하였다.

2. 가속기 시설에 관한 이론적 고찰

2.1 가속기 시설의 개념

우리 주변의 모든 물질은 원자라는 기본입자로 구성되어 있고 원자는 양성자, 전자, 이온 등의 입자로 구성되어 있다. 가속기 시설이란 입자나 이온을 전자기력으로 빛의

* 홍익대학교 건축도시대학원 석사과정

** 홍익대학교 건축도시대학원 교수

(Corresponding author : yoonds@gmail.com)

1) 목익수 외, 거대과학시설 인식에 따른 입지저항 및 입지선호에 미치는 영향요인 분석-포항 4세대 방사광가속기 사례를 중심으로-, 2020.12

속도에 가깝게 빠른 속도로 가속 시켜 고에너지를 갖게 해주는 장치로 다양한 과학연구 및 응용에 활용하는 장치이다. 이와 같은 가속기는 가속 시키는 입자의 종류에 따라 크게 입자가속기와 방사광가속기로 나눌 수 있다. 입자가속기는 전자, 양성자, 이온 등의 전하를 갖은 입자를 가속하여 다른 입자 또는 물질에 충돌시켜 발생하는 여러 정보를 통해 다양한 연구에 활용하는 장치이며, 방사광가속기는 전자를 가속 시켜 발생하는 X선과 감마선 등 방사선을 이용하여 물질의 내부구조 및 특성을 연구하거나 다양한 분야에 활용된다.

표1. 가속기의 종류


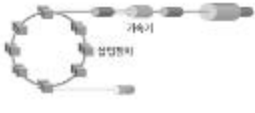
분류	가속입자	활용
방사광 가속기	전자	물질 구조 및 특성 연구, 의학적 응용, 재료 연구 및 개발, 화학 반응 및 동력학 연구, 환경 및 지구과학 연구, 물질의 정적 구조분석 및 동적 현상 실시간 관측 등
양성자 가속기	양성자	의료 응용(암치료), 원자핵 물리학 연구, 핵 에너지 연구 및 응용, 기초과학 연구, 재료과학 및 나노 기술, 동위원소 생산 등
중성자 가속기	중성자	재료과학 및 원자력공학, 의료 및 생명과학(암치료 및 치료기술 연구), 환경 및 지구과학 연구, 에너지 연구 등
이온 가속기	이온	원자핵 물리학 연구, 재료과학 및 나노 기술, 의료 응용, 환경 및 지구과학 연구, 산업 응용, 희귀동위원소 생성 및 활용 등

2.2 방사광 가속기의 형태적 종류와 차이

방사광가속기는 전자를 빛의 속도에 근접하도록 가속하여 저장링에 가두어 X선을 생성하고 이를 활용하여 다양한 실험 및 연구를 수행하는 장치이다. 이러한 장치는 활용 목적 및 사용되는 빛의 성격에 따라 선형가속기와 원형가속기로 분류된다. 이에 따라 각각의 장/단점이 있다. 주로 선형가속기는 순간적으로 일어나는 물체의 미세한 변화를 실시간 관측하는데 활용된다. 선형가속기는 짧은 시간 동안 발생하는 빠른 변화를 관찰하는 데 적합하며, 고에너지의 전자빔을 생성하여 미세한 구조의 변화를 관찰하는 데 활용된다. 반면, 원형가속기는 다양한 파장의 빛을 생성하여 물체의 구조 및 소재의 원소 구성을 관찰하는 데 주로 사용된다. 원형가속기는 빛의 파장을 조절하여 다양한 분석 및 관측에 활용된다. 또한, 고에너지의 빔을 생성하여 소재의 내부 구조나 화학적 특성을 분석하는 데 적합하다. 이처럼 선형가속기와 원형가속기는 각각의 사용 목적과 특성에 따라 다양한 연구 및 실험에 활용되며, 이를 고려하여 적합한 가속기를 선택하여 연구를 수행해야 한다. 한국기초과학연구원 자료를 토대로 각 가속기의 특성 및 비교를 <표2>처럼 정리할 수 있다.²⁾

2) 한국기초과학연구원 공식 블로그, 인포그래픽 원형/선형 방사광가속기의 차이, 2020.09.25

표2. 방사광가속기의 형태에 따른 비교

분류	선형 가속기	원형 가속기
구조		
활용	찰나의 순간 동안 발생하는 빛을 통해, 순간적으로 일어나는 물체의 미세한 변화 실시간 관측	다양한 파장의 빛으로 물체의 구조 및 소재의 원소 구성 관찰
장점	<ul style="list-style-type: none"> · 설치 및 운영이 비교적 간단 · 직선형의 아주 긴 삽입장치를 지나면서 강력한 방사광 생성 · 빔손실이 적고 안정적인 빔을 생성할 수 있음(세기가 강하고 결 맞는 빛으로 멀리 도달할 수 있는 레이저의 특성) 	<ul style="list-style-type: none"> · 회전형 구조로 인해 가속기의 길이가 짧아도 높은 에너지의 빔을 생성할 수 있음 · 여러 개의 가속기를 연결하여 연속적으로 높은 에너지의 빔을 생성할 수 있음 · 다양한 에너지 범위에서 가속이 가능
단점	<ul style="list-style-type: none"> · 가속기의 길이가 한정적이며, 일정한 에너지까지만 가속이 가능 · 고속의 입자를 가속시키는 데 한계가 있을 수 있음 	<ul style="list-style-type: none"> · 고리형 구조는 복잡한 제어시스템과 많은 수의 자기장 및 진공 시스템이 필요 · 가속기 내부의 빔손실이 발생할 수 있음

2.3 방사광가속기 구성 공간

방사광가속기 시설의 구성공간은 크게 본부동, 연구동, 빔터널(저장링, 부스터링), 유틸리티(설비동) 등 이 있다. 가속기 시설 구성에 대한 자료는 다목적 방사광가속기 구축사업 기획보고서에서 있는 자료<표 3>³⁾처럼 정리된다.

표3. 방사광가속기의 공간 구성

구분	건물명	연면적(㎡)	주요시설
필수 시설	본부동	7,500	<ul style="list-style-type: none"> · 공용공간 및 사무실 · 상업지원 분석실, 비즈니스 지원실 · 산업체인력양성실
	연구동1,2	7,000	<ul style="list-style-type: none"> · X-선 광학계개발실 · 기계진공조립실, 전자기개발실 · 제어개발실, 방사광 실험데이터 저장소 · 진공테스트실, Machin Shop · 광학장치개발실 · 운전시설/공용공간/빔라인지원시설
	저장링동	37,500	<ul style="list-style-type: none"> · 터널, 실험실, 빔라인 * 직경 300 ~400m의 원형 건물

3) 과학기술정보통신부, 다목적방사광가속기 구축사업 기획지원 연구, 54P, 2020.05

필수 시설	선형 가속기동	1,500	<ul style="list-style-type: none"> 터널, 갤러리 클라이스트론, 조립실 연구실, 보관실
	초전도 고주파동	1,200	<ul style="list-style-type: none"> 초전도실, 제어실 클라이스트론 조립실 연구실, 보관실
	중앙 수전변동	1,800	<ul style="list-style-type: none"> 154kV 수변전 시설 야외 야드
	전력설비동	1,600	<ul style="list-style-type: none"> 조닝별 전력설비
	중앙기계동	3,000	<ul style="list-style-type: none"> 중앙기계시설
	공조기계동	1,600	<ul style="list-style-type: none"> 조닝별 기계시설
	연구실험 지원동1	5,600	<ul style="list-style-type: none"> 가속장치시험실, 대전력연구실 자장측정실, 진공조립실 진단장치연구실, MPS연구실 가공실, 정밀측정실 빔라인장치실, 장비보관실 연구실 등
	연구실험 지원동2	400	<ul style="list-style-type: none"> 화학세정실, 화학약품 보관시설
	연구실험 지원동3	500	<ul style="list-style-type: none"> 방사성안전 관련 보관시설 및 교정실 가스/유류 보관시설
	보안관리동	200	<ul style="list-style-type: none"> 출입시설, 보안관리시설
소계	69,400		
추가 필요 시설	연구동 3,4	6,000	<ul style="list-style-type: none"> 빔라인 실험지원, 연구실
	연구실험 지원 4동	600	<ul style="list-style-type: none"> 장치보관실, 폐기물 보관시설
	숙소동	6,000	<ul style="list-style-type: none"> 방사광이용자 숙소
	식당 및 홍보관	3,000	<ul style="list-style-type: none"> 식당 및 홍보시설
	소계	15,600	
계	85,000		

3. 사례분석

3.1 분석대상 및 방법

분석대상은 해외 방사광가속기 중 온라인에서 평면적 구조를 확인할 수 있는 대상으로 하였으며, 3~4세대 원형 방사광가속기를 대상으로 한다. 현재 오창 다목적방사광가속기가 설계에 들어가면서 많은 이슈가 되었던 원형 방사광 가속기를 대상으로 사례를 분석하고 그에 따른 배치 특징을 비교한다. 방사광가속기의 인필드 진입형태, 부스터링과 저장링의 형태, 유틸리티의 배치 형태, 연구동의 배치 형태 등에 따른 계획 등 공간적 배치 특성을 분석한다. 분석대상인 해외 방사광가속기의 사례와 개요는 아래 <표 4>과 같다.

표4. 사례분석 대상 시설개요

구분	사례 1	사례 2	사례 3	사례 4
	ESRF Synchrotron	ALBA Synchrotron	TPS Synchrotron	NLS-II Synchrotron
국가	프랑스	스페인	대만	미국
에너지	6.0 GeV	3.0 GeV	3.0 GeV	3.0 GeV
세대	3세대	3세대	3세대	3세대
년도	1994년	2010년	2015년	2015년
저장링 둘레	약 844m 지름 약 269m	약 268m 지름 약 86m	약 518m 지름 약 157m	약 792m 지름 약 252m
구분	사례 5	사례 6	사례 7	사례 8
	APS Synchrotron	SIRIUS Synchrotron	Diamond-II Synchrotron	MAX-IV Synchrotron
국가	미국	브라질	영국	스웨덴
에너지	6.0 GeV	3.0 GeV	3.5 GeV	3.0 GeV
세대	4세대	4세대	4세대	4세대
년도	1995년	2001년	2010년	2016년
저장링 둘레	약 1,100m 지름 약 350m	약 561m 지름 약 179m	약 560m 지름 약 178m	약 528m 지름 약 168m

3.1 인필드 진입형태에 따른 유형분류

진입방식은 크게 지상진입, 지하진입, 진입불가 3가지 유형으로 나눌 수 있다. 이는 입지차이 및 관리 동선에 따라 결정된다. 가속기 시설의 특성상 빔라인의 간섭이 없이 입지의 특성을 고려하여 상부진입(사례1,3), 하부진입(사례4,5,6,8)로 구분되며 인필드로 차량 진입불가(사례2,7)의 경우 유지보수를 위한 차량 접근이 어려운 단점을 확인 하였다.

표5 인필드 진입 형태



상부진입	지하진입	진입불가
		
1,3	4,5,6,8	2,7

3.2 부스터링 형태에 따른 유형분석

전자총(Electron Gun)에서 생성된 전자빔은 선형가속기(Linac)을 통해 높은 에너지로 가속되며, LTB(Linac to Booster)를 통해 부스터링(Booster ring)으로 전송되어 추가적으로 가속된다. 이때 가속된 전자빔은 BTS(Booster to SR)을 통해 저장링(Storage ring)으로 전송되고 이때 자기장으로 전자빔의 방향을 바꾸어 방사광을 생성한다. 이러한 연결에서 크게 부스터링과 저장링이 물리적으로 한 구조 내에 위치하여 빔터널을 공유하는 일체형과 부스터링이 별도로 계획되는 분리형 2가지로 구분된다. 일체형의 경우 하나의 구조로 통합되어 에너지 손실이 저감되고 시

설 내부공간을 효율적으로 활용할 수 있는 장점이 있지만, 분리형의 경우 별도 유지보수가 가능하고 저장링과 부스터링의 중 어느하나의 고장이 영향을 주는 것을 방지할 수 있는 장점이 있는 것으로 사료된다. 분석에서도 다수의 사례(1.4.5.7.8)가 분리형을 취하고 있는 것을 볼 수 있다.



표6. 부스터링, 저장링의 형태

일체형	분리형
	
2,3,6	1,4,5,7,8

3.3 유틸리티 배치 형태에 따른 유형분류

방사광가속기 시설의 유틸리티 공간은 전력동, 기계동, 공조동, 수변전동, RF동 등으로 구성된다. 이러한 유틸리티는 가속기 시설의 안정적인 운영을 위해 필수적인 전력, 냉각, 공기 압축 등과 같은 기본적인 역할을 하며 대부분 빔라인을 지원하기 위해 가속기동 내부 인필드에 위치하지만, 서브 기계실이나 전기실이 분산되어 배치된 경우가 확인된다. 특히 선형가속기와 부스터링이 길게 연결된 MAX-IV Synchrotron의 경우 유틸리티가 더욱 많이 분산되어 배치된다. 이러한 배치형태는 가속기동의 빔라인 설비에 라인에 따라 혹은 서브 유틸리티의 필요성에 따라 추가 배치되는 것으로 사료된다. 필요에 의한 계획이지만 관리동선이 길어져 유지보수 측면에서의 단점이 존재한다.

표6. 유틸리티의 형태

분산형	집중형
	
2,3,4,8	1,5,6,7

3.4 연구동 배치 형태에 따른 유형 분석

연구동의 배치는 크게 별동형, 집중형, 균등형 3가지로 나눌 수 있으며 각 장단점이 존재한다. 별동형은 독립적 건물로서의 공간 활용성과 연구동들 사이의 거리가 짧아지는 장점이 있지만 각 허치로부터 멀어져 협업에 어려울 수 있고 초기 배치에 따라 확장의 어려움이 있다. 집중형은 별동형과 달리 가속기 시설을 중심으로 등글고 길게 배치되어 별동형의 단점이 감소하지만 각 허치에서의 거리를 단축하기 위해 ESRF Synchrotron에서는 중요 연구실을 균등형으로 배치하고 나머지 공간을 집중형으로 배치한 것으로 보여진다. 균등형은 연구동들이 균등하게 배치되기 때문에 특정 연구동에 대한 수요가 많거나 적을 경우 공간 효율성이 제한 될 수 있으나 연구원들의 동선 및

연구 효율은 높아지는 장점이 있는 것으로 사료된다.

표7. 연구동 배치 형태에 따른 유형분류

별동형	편심형	균등형
		
3,8	1,2	4,5,6,7

4. 결론

본 연구에서 현재 가동 중인 8개의 방사광가속기 해외 사례들을 중심으로 분석한 결과는 다음과 같다.

첫째, 차량 인필드진입의 결정요인은 계획입지 및 관리동선에 있으며 하부진입이 특징을 갖은 사례들이 많았다. 입지적으로 주변보다 높은 레벨에 구축되는 가속기 특성상 하부진입이 접근성에서 장점을 갖는 것으로 보여진다.

둘째, 부스터링/저장링 분리형인 사례가 많았으며, 비교적 분리형이 유지보수 측면의 장점을 갖으나, 요구되는 설비와 효율성을 고려한 배치가 필요할 것으로 사료된다.

셋째, 가속기 시설에서 빔라인에 필수적인 유틸리티는 인필드 내 집중형으로 배치되면 추가적으로 필요한 경우 분산형으로 배치되는 것을 확인할 수 있었다. 필요에 의한 계획이지만 연구 관련 장치가 많은 시설의 특성상 가능한 유틸리티를 집중형으로 계획하는 것이 관리동선 및 유지보수의 측면에서 장점을 갖는 것으로 사료된다.

넷째, 연구동 형태는 균등형인 사례가 가장 많았으며, 연구원들의 실험 및 결과에 대한 동선이 짧아져 업무의 효율성이 높아지는 것으로 사료된다.

본 연구에서는 제한된 자료와 부족한 사례를 바탕으로 심층적인 분석을 수행하는데 어려움이 있었으나, 방사광가속기 시설의 공간계획에 대한 기초자료를 제공함으로써 의미가 있다. 본 연구를 기반으로 미래 국가 경쟁력을 결정짓는 핵심 시설인 방사광가속기 시설의 건축계획에 대한 연구의 기초자료를 제공하고, 이를 통해 향후 보다 심층적이고 체계적인 논문이 발표될 것을 기대한다.

참고문헌

1. 노도영, 방사광 X-선 광원의 진보 : 1~4세대, 2017
2. 다목적 방사광가속기 (Korea-4GSR) 개념설계보고서, 포항가속기연구소, 2021.04
3. 2020년도 국가연구개발사업 상위평가 보고서, 과학기술정보통신부, 한국과학기술기획평가원, 2021.01
4. 다목적 방사광가속기 구축사업 기획보고서, 과학기술정보통신부, 2020.05
5. 함선영, KISTEP 기술동향브리프-방사광가속기, 한국과학기술기획평가원, 2020
6. 한국기초과학연구원 공식 블로그, 인포그래픽 원형/선형 방사광가속기의 차이, 2020.09.25.
7. 황정연 외 5명, 방사광가속기 구성, 포항가속기연구소