

# 융합연구리뷰

## Convergence Research Review

X선 자유전자 레이저  
4세대 방사광 그 무궁한 가능성

과학을 넘어 기적으로  
장애인용 착용형 로봇



C o n v e r g e n c e   R e s e a r c h   R e v i e w

# Contents

융합연구리뷰 | Convergence Research Review

2017 March vol.3 no.3

- 03 편집자주
- 04 X선 자유전자 레이저, 4세대 방사광 그 무궁한 가능성
- 28 과학을 넘어 기적으로 장애인용 착용형 로봇



발행일 2017년 03월 06일

발행인 하성도

편집인 안주명 김보림

발행처 한국과학기술연구원 융합연구정책센터

02792 서울특별시 성북구 화랑로 14길 5

Tel. 02-958-4984 | <http://crpc.kist.re.kr>

펴낸곳 승일미디어그룹 주식회사 Tel. 070-7416-4124

디자인 이숙현 김현진 박수정

## | 꿈의 빛 시대 도래, 4세대 방사광 가속기 기술

2016년 9월, 우리나라는 세계에서 3번째로 포항에 4세대 방사광가속기를 준공하며 ‘꿈의 빛’시대를 개막하였다. 4세대 방사광가속기는 기존 3세대보다 10억 배 이상 밝고 1,000 배 빠른 빛의 발생을 통해 초미세 세계와 살아있는 세포의 움직임을 관측할 수 있는 최첨단 과학기술의 집약체이다. 세계적으로 4세대 방사광가속기는 ‘10대 과학적 성과(미국)’와 ‘꿈의 기술(일본)’ 등으로 불리며, 우리나라의 가속기 준공은 과학기술 수준을 세계적으로 인정받는 계기가 되었다.

방사광가속기는 X-선, 자외선 등의 빛을 연구에 활용하는 시설로 물리뿐만 아니라 화학, 생명공학, 기계공학, 의학 등 대부분의 과학기술분야에서 활용이 가능하다. 특히 신약개발, 인공 광합성 개발, 살아있는 세포 관측을 통한 질병원인 규명에 소요되는 비용과 시간을 획기적으로 단축할 수 있을 것으로 기대되고 있다. 포항에 건설된 4세대 방사광가속기는 올해 3월 말부터 본격적으로 가동되며, 4월부터는 국내 연구자도 실험에 활용할 수 있게 된다.

이에 본 호 1부에서는 4세대 방사광가속기 단장 고인수 교수를 통해 방사광가속기의 개념과 연구동향 및 전망에 대해 살펴보고자 한다. 4세대 방사광가속기는 앞으로 국가 과학기술분야의 첨병 역할을 수행하며, 우리나라 미래 성장 동력의 도화선으로 작용할 것으로 기대해 본다.

## | 사회가 원하는 첨단기술, 장애인용 착용형 로봇 기술

최근 인문학적 사고를 기반으로 한 융합기술의 발전이 사회지향적 과학기술로 주목을 받으며, 첨단기술이 무엇을 위한 것인가 다시 한 번 생각하게 하고 있다. 특히, 감동과 공감 그리고 가족을 위한 과학기술을 기대하는 현 시대에 장애인을 위한 착용형 로봇기술은 이를 반영한 첨단기술 중 하나라 할 수 있다. 2016년 10월, 스위스 취리히에서 장애인의 재활의지와 로봇기술을 이용한 연구개발 축진을 목적으로, 과학자와 공학자, 그리고 장애인이 한 팀이 되어 참가하는 국제로봇대회 ‘사이배슬론(CYBATHLON)’이 개최되었다. 이 대회는 ‘아이언맨 올림픽’이라고도 불리며 세계적으로 많은 관심을 받았으며, 우리나라는 대학, 병원, 기업으로 구성된 연구팀이 참가해 동메달을 따는 쾌거를 이뤘다.

장애인 및 노약자를 위한 착용형 로봇 기술은 현재 세계 각국에서 활발하게 연구되고 있으며 일부는 이미 상용화 단계에 이르렀다. 신체가 약화된 노약자의 경우 로봇의 무게, 방수, 방진, 사용자의 의도 파악 등 고려해야 될 사항들이 매우 많고 까다롭기 때문에 다분야 기술의 융합이 필수적이다.

이에 본 호 2부에서는 ‘사이배슬론’대회에서 3위를 수상한 국내연구팀의 공경철 교수를 통해 불편한 생활을 개선시키고 보완해줄 착용형 로봇에 대한 기술 동향과 전망에 대해 살펴보고자 한다. 우리나라가 현재 웨어러블 로봇 분야에서 충분한 경쟁력을 가지고 있는 만큼, 앞으로 다분야의 융합 연구를 통해 웨어러블 로봇 분야의 선두가 되길 기대해 본다.

# 01

## X선 자유전자 레이저 4세대 방사광 그 무궁한 가능성

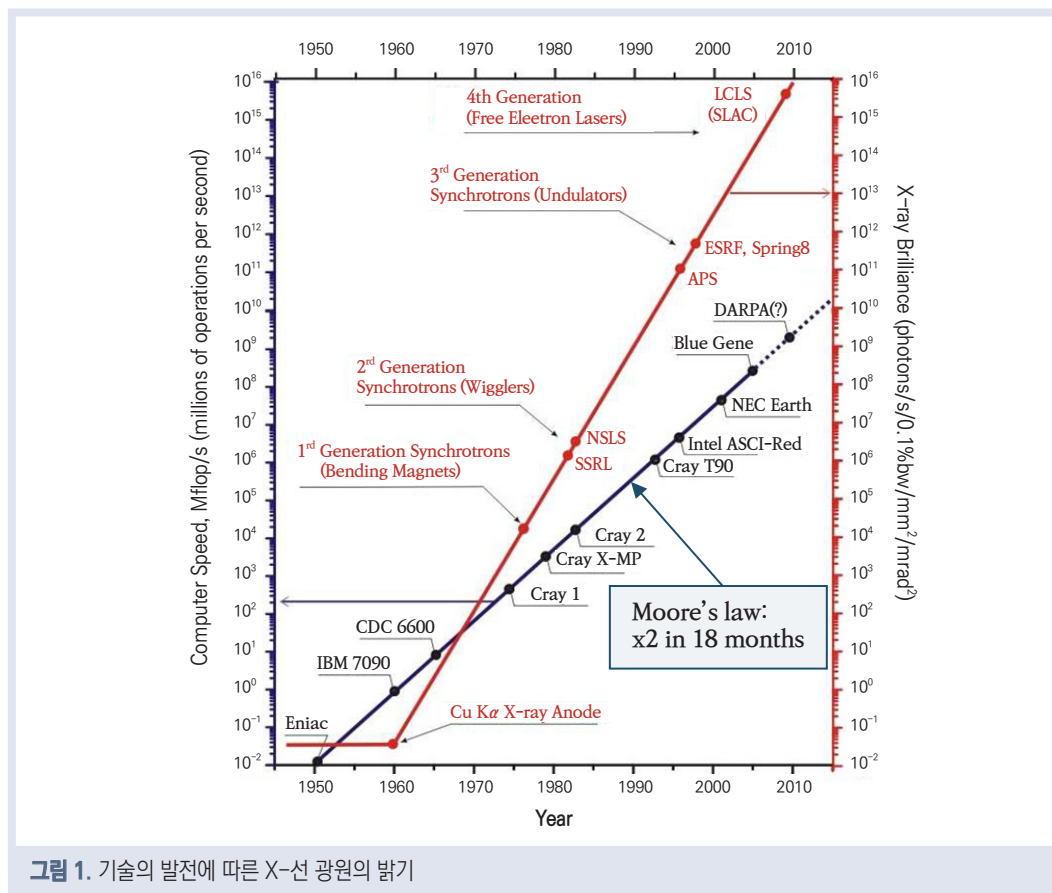
포항공과대학교 첨단원자력공학부  
고인수 교수 (isko@postech.ac.kr)

# 01 머릿말

1895년 독일 과학자 뢰트겐이 X-선을 발견한 이후 물질의 구조에 대한 이해가 근본적으로 바뀌었으며, 물리, 화학, 생명과학 분야를 비롯한 과학기술 전반에 혁신적인 변화를 가져왔다. 그러나 X-선 발생장치는 뢰트겐 이후 처음 50여년 동안은 크게 발전하지 못하였으나 가속기, 특히 전자가속기의 발전에 따라 비약적으로 성능이 개선되었다. 지난 60여년 간 방사광가속기는 기존의 입자물리학 연구용 가속기에 기생하는 형태로 사용되던 1세대(1960년대)를 지나 방사광 전용으로 건설되었던 2세대 (1980년대 초반까지), 그리고 1980년대 후반부터 삽입장치라는 특별한 구조의 영구자석을 사용하여 밝기와 빔의 안정도를 획기적으로 개선한 3세대 방사광가속기에 이르기까지 빠르게 진화되었으며, 빔의 크기가 물리적 한계인 회절한계(diffraction limit)에 도달한 최신형 3세대 설비가 2010년 이후부터 가동되기 시작하였다. 이처럼 방사광가속기는 최첨단 과학기술의 결집으로 광범위한 응용 및 파급효과를 창출하기 때문에 과학기술에 바탕을 둔 국가경쟁력의 척도로 인식되고 있으며, 이미 20세기 중후반부터 선진국들을 중심으로 국가 발전과 경쟁력 제고에 필수적인 과학기술 발전의 견인차적인 거대과학 시설로 활용되고 있다.

한편 △레이저 특성 △짧은 파장 △강력한 밝기 △빠른 펄스 등의 성질을 모두 갖춘 4세대 방사광은 3세대 방사광원보다 10억 배 이상 밝다. 그래서 기존의 3세대 방사광에서 밝기의 한계 때문에 상대적으로 긴 시간 동안 노출시킨 정지된 영상 정보만 얻을 수 있었지만, 4세대 방사광으로는 물질의 내부에서 일어나는 현상을 실시간으로 관찰할 수 있다. 즉 화학반응에서 일어나는 반응의 중간과정들을 펨토초(femto-second, 1,000조분의 1초)의 시간분해능 수준으로 볼 수 있게 되었다. 그리고 강력한 레이저의 특성을 이용하여 결정이 아닌 한 개의 DNA 분자로부터 복잡한 구조를 갖는 비결정 구조의 해석에 필요한 정보 수집도 가능하다. 4세대 방사광은 극미 세계를 연구하는 나노과학과 극초단의 빠른 세계를 연구하는 펨토과학을 동시에 가능하게 하여, 새로운 과학적 지식과 기술개발을 창출할 것이다. 이러한 특성이 여러 나라에서 4세대 방사광가속기를 경쟁적으로 구축하는 핵심 이유이다. <그림 1>은 X-선 광원의 밝기가 시대에 따라 변화한 내용을 보여준다. 참고로 방사광의 밝기는 반도체 집적도의 척도인 무어의 법칙<sup>i</sup>보다 훨씬 빠른 속도로 발전하였다.

i) 반도체 집적회로의 성능이 18개월마다 2배로 증가한다는 법칙. 경험적인 관찰에 바탕을 둔 것으로 인텔의 공동 설립자인 고든 무어가 1965년에 발표.



## 02 배경

1994년 포항방사광가속기(Pohang Light Source: PLS)의 준공으로 당시 우리나라는 세계 5번째로 3세대 방사광가속기 보유국으로 부상하였다. PLS 준공 당시에는 미국, 일본, 프랑스 등 선진국들만이 이러한 거대시설을 보유하고 있었으나, 지금은 전 세계적으로 방사광가속기가 한 나라의 첨단 과학기술과 산업기술 개발에 필수적인 시설로 인식되고 있다. 이에 따라 선진국들뿐만 아니라 중국, 태국, 브라질, 인도와 같은 개발도상국들도 앞다투어 방사광가속기를 보유하고 있는 상황이다. 또한, 요르단에서는 유럽과 미국의 도움으로 중동 지역 최초의 방사광가속기가 건설되고 있다.

포항방사광가속기는 1995년 9월부터 이용자 지원을 시작한 이후 급격하게 늘어나는 수요를 감당하기 위하여 지속적인 정부의 투자로 초기 2기의 빔라인이 현재 32기로 확장되었으며, 2009~2011년에 성능개선 사업을 통하여 빔의 안정도와 밝기가 비약적으로 개선되었다. 2016년의 경우 연인원 5,248명의 연구자가 1,363건의 실험을 수행하였으며, 457편(IF 평균 6.3)의 논문을 발표하여 우리나라의 과학기술 분야의 연구 수준이 획기적으로 향상되는데 크게 기여하였다.

나아가 3세대 방사광의 한계를 뛰어넘는 4세대 방사광에 대한 연구 역시 1980년대부터 지속적으로 진행되어 왔으며, 미국, 영국, 독일, 이탈리아, 일본 등에서 원리 검증을 위한 소규모 설비가 건설되었다. 그러나 2000년대에 들어서면서 미국 스탠포드가속기연구소(SLAC National Accelerator Laboratory: SLAC)의 길이 3.2km, 빔에너지 50-GeV 선형가속기와 입자충돌 실험 설비(SLAC Linear Collider: SLC)가 경쟁 상대인 유럽 입자물리연구소(CERN, Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire)의 신행 가속기인 LHC(Large Hadron Collider)에 비해 비교 우위를 잃게 되자, 미국 정부는 과감히 입자물리학의 도구로 사용되었던 50-GeV 선형가속기와 SLC를 폐쇄하기로 결정하였다. 이에 미국 방사광 이용자들은 이 시설의 폐쇄 대신 4세대 방사광가속기로 전용하기를 청원하였고, 마침내 2009년 Linac Coherent Light Source (LCLS)라는 새로운 이름의 4세대 방사광 설비가 탄생하였다. 이 설비는 기존 선형가속기의 마지막 1-km를 4세대로 변경하였으며, 이후 늘어나는 이용자들을 감당하기 위하여 SLAC은 2019년 완성을 목표로 기존 선형가속기의 처음 1-km 공간에 새로운 가속기인 LCLS-II를 건설하고 있다.

독일의 경우 국립연구소인 독일가속기연구소(DESY, Deutsches Elektronen-Synchrotron)를 중심으로 입자물리학 연구용 국제선형가속기(International Linear Collider: ILC)를 건설하려던 노력이 성공하지 못하자, ILC의 원천기술인 초전도 가속관을 바탕으로 유럽공동체가 투자한 Euro-XFEL (X-ray Free-Electron Laser)의 건설(2009년)로 방향을 틀었다. 먼저 시험적으로 FLASH라는 소규모 4세대 방사광 설비를 2004년에 완성하여, 본 설비인 Euro-XFEL에 필요한 3.5-km, 20-GeV 규모의 요소 기술을 검증하며 이용자 집단을 육성하였다. 한편, 스위스의 경우 Euro-XFEL의 참여국이지만 독자적으로 4세대 설비 건설을 위해 국립연구소인 Paul Scherrer Institute (PSI)의 주도 하에 2009년부터 구축사업을 진행 중이다.

일본의 4세대 방사광가속기는 앞의 경우와 상당히 대조적인 의사결정으로 건설되었다. 일본 정부의 과학기술분야 장기 계획에는 4세대 방사광가속기 건설은 적어도 2004년까지는 포함되어 있지 않았다. 그런데 2004년 7월 16일 POSTECH에서 개최되었던 국제물리올림피아드 행사에 참석한 당시 노무현 대통령이 과학기술을 통한 우리나라 국가발전을 위한 사업으로 4세대 방사광가속기 구축을 지원할 것을 약속한 사건이 일본

에 큰 자극을 주었으며, 일본 정부는 이례적으로 장기 계획에 포함되어 있지 않은 4세대 방사광가속기를 이화 학연구소(RIKEN) 소속의 SPring-8 부지 내에 건설하기로 결정하였다. 2011년에 완성된 이 설비의 이름이 SACLA이다.

포항의 4세대 방사광가속기(PAL-XFEL)는 2002년에 포항가속기연구소(PAL: Pohang Accelerator Laboratory)가 기존의 포항방사광가속기(PLS)를 개조한 구조로 건설을 제안하였다. 2004년 당시 대통령의 지원 약속이 있었으나 그 규모가 국내 방사광 이용자들의 요구에 부합하지 못하였으며, 2010년 현재의 규모로 확장한 설계를 통해 예비타당성조사를 거쳐 2011년 4월 4,000억원의 예산으로 구축사업이 시작, 2015년 말에 계획대로 사업이 완료되었다. 2016년 4월 방사선 발생장치 사용허가를 받아 종합 시운전을 시작하였고, 같은 해 6월 X-선 자유전자레이저 발생을 확인하여 모든 장치가 정상적으로 작동함을 공식적으로 인정받았다. 2016년 말까지 2차 시운전을 진행하여 최종 목표인 10-GeV의 빔에너지와 0.15-nm 파장의 X-선 레이저 발진에 성공하였으며, 2017년 국내외 이용자들이 사용할 수 있게 되었다. <표 1>에 세계 4세대 방사광가속기(경 X-선<sup>ii)</sup>) 현황을 정리하였다.

▼ 표 1. 세계 4세대 방사광가속기 현황

	LCLS(미국)	SACLA(일본)	PAL-XFEL(한국)	SwissFEL	Euro-XFEL
Electron Energy (GeV)	14	8	10	5.6	17.5
Photon Energy (keV)	12.4	15	12.4	12	25
Accelerating Structure Type	Normal S-band	Normal C-band	Normal S-band	Normal C-band	SC* L-band
Rep. Rate (Hz)	120	60	60	100	10x22,000
Undulator** Type	out vacuum	in vacuum	out vacuum	in vacuum	out vacuum
Undulator Gap	fixed	variable	variable	variable	variable
First Lasing	2009	2011	2016	2017	2017

\* SC : Superconducting

\*\* Undulator : 방사광을 얻는 장치

ii) 파장의 길이가 0.1-nm 이하의 X-선. 투과력이 우수하여 시료의 내부 구조를 투시할 수 있어서 비파괴 영상 검사의 목적으로 널리 활용됨.

참고로 3세대까지 기존의 방사광가속기가 원형인데 비하여 4세대 방사광가속기는 직선형이다. 4세대 방사광원을 만들기 위해서는 매우 작은 에미턴스(emittance: 전자빔의 특성을 나타내는 물리량으로 크기가 작을수록 좋음)의 전자빔을 가속하는 전자 선형가속기가 필요하다. 3세대 방사광가속기에서 전자빔은 일정하게 배치된 2극자석을 지나면서 진행방향이 호(arc)를 그리며 휘게 되고, 동시에 접선 방향으로 방사광을 방출한다. 방사광은 빛 알갱이인 광자(photon)이므로 빛을 내보낸 전자빔은 방출된 광자가 주는 운동량 변화로 인해 에미턴스가 커진다. 이를 양자교란(quantum fluctuation)이라고 하며, 이로 인하여 저장링의 에미턴스는 더 이상 줄어들지 않는다. 그러나 선형가속기는 전자빔이 가속을 받아 에너지가 커질수록 에미턴스는 지속적으로 작아진다. 기존의 포항방사광가속기(PLS)를 건설할 당시인 1989년 포항가속기연구소는 통상적으로 많이 사용되던 부스터가속기(booster synchrotron) 대신 2-GeV 전자선형가속기를 PLS의 입사장치로 채택하였다. 당시의 국내외 전문가들은 포항의 선택을 우려의 눈으로 지켜보았지만, 포항가속기연구소(PAL)는 이를 성공적으로 건설하였으며 현재까지 20년 이상 안정적으로 운영하였다. 또한, PAL-XFEL을 빠른 시간에 건설하고 시운전까지 마칠 수 있었던 모든 원동력은 바로 PLS 입사기로 채택되었던 2-GeV 선형가속기로부터 기인한다고 해도 과언이 아니다.

## 03 4세대 방사광가속기 건설

4세대 방사광가속기 건설 부지조성공사는 2012년 9월부터 시작되어 2013년 5월에 완료되었으며, 120,620㎡의 부지를 조성하였다. 이 공사는 12만㎡의 벌목, 154-kV 수전선로 철탑 3기 철거 및 880-m 지중화, 25톤 덤프트럭 12만대분(130만㎡)의 절토와 레미콘 3,500대분(21,078-㎡)의 연약지반 콘크리트 치환 및 4만㎡의 슬래그 치환이 수반되었다. 건축기초 레벨에서 기반암인 이암(mud stone)이 나오지 않는 지반을 연약지반으로 규정하고 건축기초 하부의 연약지반은 모두 치환재로 치환하였다. 연약지반 치환재는 기존 기반암인 이암의 침하안정성과 가장 유사한 압축강도 10-MPa의 콘크리트로 결정하였다. 또한, 이암은 공기 중에 노출되거나 물과 접하게 되면 강도가 급격히 감소되기 때문에 연약지반을 걷어낸 이암의 표면은 노출과 동시에 콘크리트로 치환되었고, 건축기초 레벨까지 이암이 형성된 지반은 동시에 버림콘크리트<sup>iii)</sup>를 타설하여 기반암을 보호하였다.

iii) 기초 · 지중보 · 토방 콘크리트 등의 밑에 전처리로서 표면을 수평으로 매끄럽게 하기 위해 타입되는 콘크리트

4세대 방사광가속기 건물공사는 부지조성공사가 마무리 되는 시점인 2013년 4월부터 시작되었다. 철골 3,460톤, 철근 6,765톤, 콘크리트 90,803㎥, 외장금속패널 103,929㎡, 급기풍량 130만CMH의 공기조화기, 3Gcal의 지역난방 열교환기, 1,500-RT(US기준)의 공조용 냉동기, 2,520-RT의 장치냉각용 냉동기, 30-MVA의 전력설비가 투입되었으며, 주 장치가 설치되는 가속기 건물과 각종 유틸리티를 공급하는 유틸리티 건물 6개동 등 총 연면적 36,764㎡의 건물이 2015년 2월 17일 완공되었다.

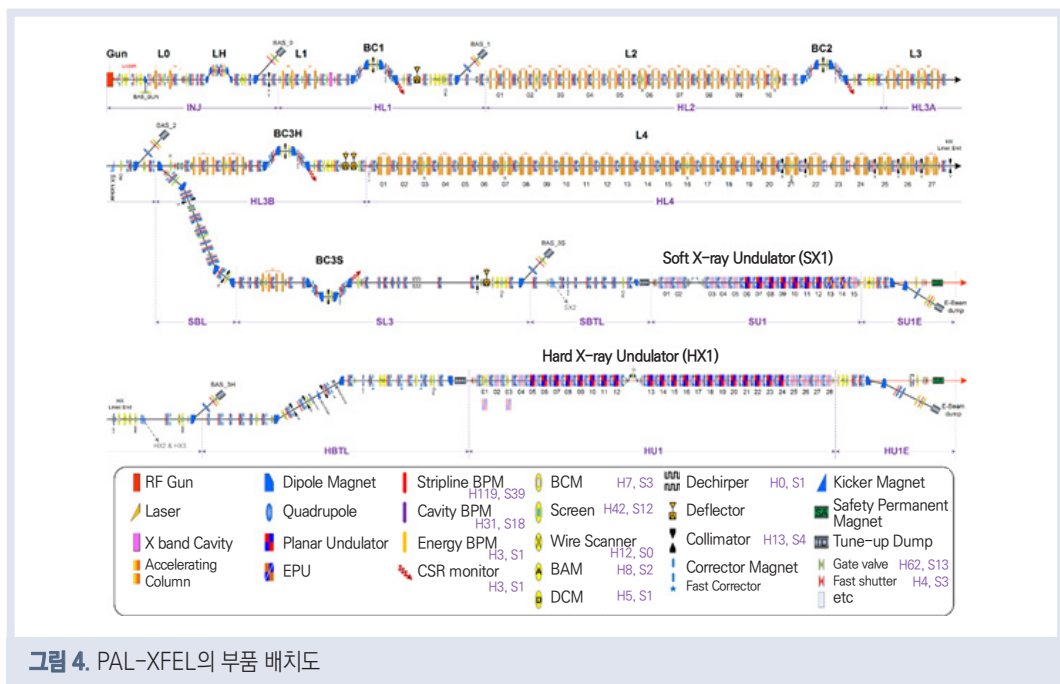
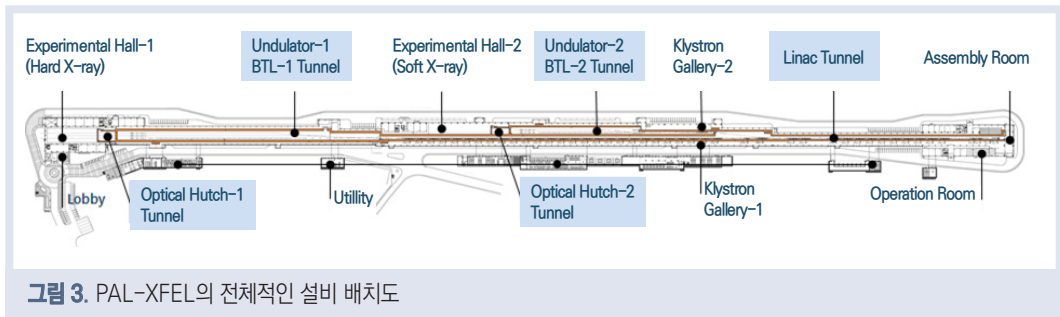
4세대 방사광가속기 건물은 선형가속기 터널 780-m, 언듈레이터 터널 250-m, 실험장치 홀 80-m가 일직선으로 연결되어 총 길이 1,110-m에 이른다. 건물의 내진 기준은 0.19-g이며, 초속 45-m의 태풍에 견디도록 설계되었다. 가속장치의 터널 벽은 방사선차폐 목적으로 상하좌우 모두 2-m의 두께이다. 1.1-km 길이에 설치된 가속장치와 빔라인장치는 설치 정렬오차가  $\pm 200\mu\text{m}$  미만이 요구되고, 특히 삽입장치 터널에 설치되는 삽입장치는 설치 정렬오차가  $\pm 50\mu\text{m}$  미만이 요구된다. 이러한 이유로 4세대 방사광가속기 건물은 긴 건물에 불가피하게 나타나는 지반 거동에 의한 건물 바닥의 수직 방향 변위가 최소화되도록 설계되어 건물바닥의 전체적인 평활도는 10-mm 이내로 시공되었고, 장기침하변위(10년)는 2-mm 이내로 관리되고 있다. 특히, 삽입장치 터널은 장치의 민감성을 고려하여 공조조건  $25\pm 0.1^\circ\text{C}$ , 습도조건 50%(상대습도), 진동조건 0.1- $\mu\text{m}$  (peak-to-peak) 이하로 관리되고 있다. 따라서 4세대 건물은 보통의 건물이 아니라 4세대 장치의 일부로 보아야 한다. <그림 2>에 완공된 4세대 방사광가속기의 전경을 나타내었다.



그림 2. 포항가속기연구소 전경

## 04 4세대 방사광가속기의 구조

포항의 4세대 방사광가속기(PAL-XFEL)는 크게 전자를 생산하고 100억볼트(10-GeV)까지 가속시키는 선형가속기(linear accelerator: linac), 가속된 전자빔이 강력한 영구자석이 교차로 배열된 공간을 지나면서 4세대 방사광을 발생시키는 삽입장치(undulators), 그리고 이렇게 방출된 4세대 방사광을 연구자들이 다양한 실험할 수 있도록 준비된 빔라인 이렇게 3부분으로 구성된다(빔라인은 이 글의 뒷부분에서 다룬다). 전체적인 설비의 배치도가 <그림 3>에, 선형가속기와 삽입장치의 상세 부품 배치도가 <그림 4>에 나타나 있다.



전자를 생성하고 10-GeV까지 가속시키는 선형가속기는 다음과 같은 주요 구성품으로 이루어진다. PAL-XFEL의 물리적, 공학적 설계는 PAL의 내부 인력들이 수행하였으며, 핵심 부품 중 고주파출력관(klystron)을 제외하고 나머지는 전량 또는 일부가 국내 업체가 제작한 국산품으로 구성되었다. <그림 5>에 선형가속기 내부가 보인다.



그림 5. 선형가속기 내부

### 광음극전자총 (Photocathode RF Electron Gun)

상용 펄스 레이저(자외선)가 잘 가공된 구리 면을 비추어 전자를 발생시키는 광음극 RF 전자총(Photocathode RF Electron Gun)을 이용하여 처음부터 낮은 에미턴스를 가진 전자빔을 만든다. PAL-XFEL의 경우 0.4- $\mu\text{rad}$ 의 매우 낮은 에미턴스를 가진 광음극전자총을 사용한다. 광음극전자총에서 방출된 전자빔의 순간전류값은 약 25-A이며, 길이는 빛의 속도로 따졌을 때 2.5-ps(약 750- $\mu\text{m}$ )이다. 200-pC 운전 시에 대략 한 펄스 당 약 10억 개의 전자가 방출된다.

### 빔압축기 (Bunch Compressor)

X-선 자유전자 레이저를 발진시키기 위해서는 아주 낮은 에미턴스를 가진 전자총만으로는 부족하고, 전자빔을 압축시켜서(compression) 아주 높은 순간전류(Peak Current)를 가지도록 해야 한다. 즉, 낮은 에미턴스와 높은 순간 전류를 가진 전자빔이 필요하다. 이 목적으로 3대의 전자빔 압축기(Bunch Compressor)가 사용된다. 3대의 빔압축기를 지나면 순간전류 3-kA, 길이 60-fs의 전자빔으로 압축된다. 실제 빔압축기 한 대에는 4개의 2극 전자석과 움직일 수 있는 진공 용기로 구성된다.

### 가속관

전자를 실제로 가속시키는 장치이며, 정식 명칭은 Disk-loaded Waveguide 이다. 가장 쉬운 형태의 가속관은 원통형 진행파(travelling-wave) 도파관이다. 그러나 이 가속관을 지나는 고주파는 위상속도가 광속보다 빠르므로 이를 늦추기 위하여 규칙적으로 원판이 설치된다. 원판 중앙에 약 18-mm의 구멍이 있어 전자빔이 이 구멍을 지나 가속된다. 길이는 입출력 결합기(coupler)를 포함하여 약 3-m이다. PAL-XFEL에 모두 180대가 설치되어 있다.

### Klystron/Modulator

고주파출력관인 klystron은 근본적으로 3극 진공관이다. 약 1-kW 2,856-MHz의 고주파 신호를 80-MW로 증폭시킨다. 이 고주파는 연결된 가속관으로 입사한다. 대부분의 경우 1 대의 klystron에 4 대의 가속관(1:4)이 연결된다. 그러나 에너지가 낮은 시작 부분은 1:1 또는 1:2의 형태로 연결된다. 2,856-MHz 50대와 이보다 주파수가 4배가 높은 11.424-GHz X-band klystron 1대로 구성된다. Modulator는 klystron에 전력을 공급해 주는 장치이다. 교류 480-V 전력이 차레로 변조되어 최종적으로 400-kV, 500-A, 7- $\mu$ s의 펄스 전력이 klystron에 공급된다. Klystron과 modulator가 설치된 공간을 Klystron Gallery라 부르며, <그림 6>와 같다.



그림 6. Klystron Gallery 전경

가속된 전자빔이 지나면서 4세대 방사광을 만드는 삽입장치<그림 7>는 크게 구조물과 영구자석으로 나뉜다. 삽입장치의 길이는 5-m이며 무게가 약 7 톤이다. 영구자석은 주기 26-mm의 네오디뮴(NdFeB) 자석<sup>iv)</sup>으로 구성된다. 아래, 위의 자석<sup>v)</sup>은 그 극이 서로 반대로 배치되어 이를 지나는 전자빔의 궤적은 sine 함수 모양이 된다. 양 극의 최소 간격은 8.3-mm이며 이 공간에 진공챔버가 설치된다. 영구자석이 진공챔버의 밖에 있으며, 상하로 배치된 자석의 간격을 조절할 수 있으므로 out-vacuum, variable-gap undulator 형태이다. 진공챔버의 가장 얇은 부분은 두께가 0.5-mm이며, 자석 면과 진공 챔버 간격 역시 0.5-mm이다. 삽입장치의 아래 위 자석이 당기는 힘은 최소 간격에서 약 10 톤에 이른다. 따라서 삽입장치의 구조물은 이 힘을 견디면서 수 미크론 이내로 아래 위 간격을 조절할 수 있어야 한다. 현재 경 X-선<sup>v)</sup>에 20대, 연 X-선<sup>v)</sup>에 7대 설치되어 있다.

iv) 현존하는 영구자석 중 가장 강한 자력(25~50MGOe)을 지닌 자석

v) 긴 파장의 성분을 다량 포함한 X-선을 일컫는 말



그림 7. 삽입장치

## 05 4세대 방사광 발생 원리

4세대 방사광의 정확한 이름은 ‘X-선 자유전자레이저(X-ray Free Electron Laser: XFEL)’이다. 최초의 레이저는 외부에서 더해진 에너지로 인해 높은 에너지 준위로 옮겨진 원자 내의 전자들이 동시에 낮은 에너지 준위로 내려오면서 만들어진 결이 맞고(coherent) 밝은 빛이다. 원자 내의 전자를 사용하는 레이저는 전자의 에너지 준위가 정해져 있기 때문에 발생하는 레이저의 파장에 한계가 있으며 주로 가시광선 영역에 속한다. 이런 한계를 극복하기 위하여 탄생한 것이 원자에 속박된 전자가 아닌 자유전자를 사용하는 ‘자유전자 레이저(Free Electron Laser: FEL)’이다. 여기서 자유전자란 금속 내부에 갇혀 있는 전자와 달리 진공 상태인 가속기 내부를 자유롭게 지나가는 전자를 의미한다.

PAL-XFEL의 선형가속기에서 가속된 전자빔은 총 길이가 150미터에 이르는 삽입장치 시스템에 입사한다. 이때 전자빔의 크기는 지름 약  $30\text{-}\mu\text{m}$ , 길이 약  $20\text{-}\mu\text{m}$ 이며, 약 10억 개의 전자가 대체적으로 균일하게 분포되어 있다. 전자빔이 삽입장치에 들어가면 규칙적인 자기장을 지나면서 자발적으로 방사광이 발생한다. 이 빛은 3세대 방사광가속기의 방사광과 동일하다. 삽입장치 구간의 처음 30미터 정도의 구간을 이 빛과 전자빔이 같이 지나면서 서로 상호작용을 하여, 서서히 전자빔 내부의 전자들이 일정한 간격을 두고 뭉치기 시

작한다. 이는 구름 속에 있는 수증기들이 뭉쳐 빗방울이 되는 과정과 유사하다. 한번 뭉쳐지기 시작한 전자 빔 내의 전자들은 지속적으로 뭉쳐지면서 결국 설계된 파장의 빛이 가지고 있는 주기적 특성에 따라 상대적으로 에너지가 낮은 파동의 골로 모인다. 이렇게 되면 전자빔은 설계된 파장 간격(PAL-XFEL의 경우 0.1-nm)으로 전자의 밀도가 변조된다. 이렇게 파장 간격으로 뭉쳐진 전자빔 내의 구조를 micro-bunch라고 한다. 따라서 0.1-nm 안에 몰려 있는 전자의 뭉치인 micro-bunch는 한 개의 큰 전하량을 가진 전자처럼 빛을 발생시킨다. 그리고 같은 간격으로 떨어져 있는 다른 micro-bunch들이 내는 파장은 위상이 같아서 보강 간섭(같은 위상의 두 파동이 중첩될 때의 간섭)을 일으키게 된다. 보강 간섭을 한 방사광은 전자 밀도를 더욱 변조시키고, 변조된 micro-bunch는 더욱 강력한 방사광을 발생시킨다. 이 과정은 처음에는 일종의 잡음처럼 무질서하게 시작되지만 한 번 결이 맞기 시작하면 이 현상이 자발적으로 계속 일어나므로 이를 SASE(Self Amplified Spontaneous Emission)이라고 하여 4세대 방사광이 만들어지는 핵심 원리이다. <그림 8>은 micro-bunching 과정을 보여준다. 이러한 증폭 과정을 차례로 거쳐서 결국 최대 밝기가 3세대 방사광원보다 10억 배 이상 밝은 4세대 방사광이 발생한다.

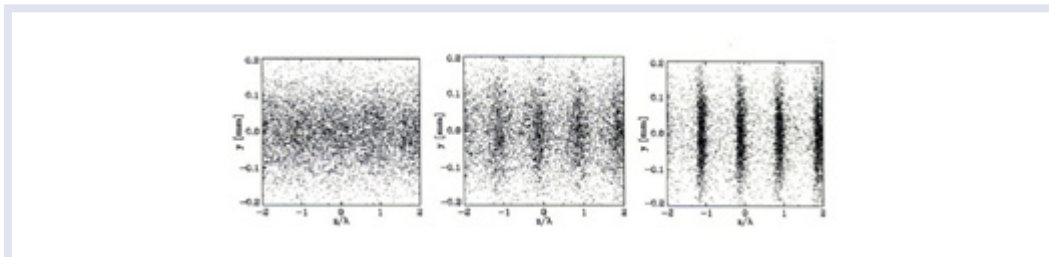


그림 8. 컴퓨터 시뮬레이션을 통한 micro-bunching 과정 (왼쪽이 입사 직전, 오른쪽은 micro-bunching이 일어난 모습)

출처: T Pfeifer et al., 2006, IOP Publishing

## 06 주요 이용분야

뢴트겐의 X-선 발견 이후 과학자들은 X-선을 크게 나누어 3가지 방법으로 물질 연구에 사용하였다. 첫 번째는 X-선 산란(scattering)으로 짧은 파장의 X-선으로 물질의 구조를 원자 수준까지 알 수 있게 되었다. 두 번째는 X-선 분광학(spectroscopy)으로 화합물의 구조와 결합을 알아낼 수 있었으며, 세 번째로 X-선 이미징(imaging) 기법으로 X-선의 강력한 투과력으로 복잡한 물질 내부 구조를 비파괴적으로 알 수 있게 되었다. 4세대 방사광 역시 이 3가지 방법이 기반을 이루지만 연구대상에 따라 두 가지 이상의 복합적인 방법이 사용되기도 한다.

### 새로운 수준의 시간/공간 분해능

모든 화학 반응은 전자의 운동에 기반을 두지만 이 운동을 지금까지 알려진 방법으로 측정하기에는 너무 빠르다. 작은 크기의 분자에서 화학결합을 이루는 전자의 운동량 변화가 전달되는 시간은 펨토초보다 훨씬 짧은 시간에 이루어진다고 여겨진다. 대표적인 예가 바로 태양 에너지가 분자 속으로 흡수되는 과정이다. 이는 우리가 일상 생활에서 너무나 익숙한 현상으로 식물의 광합성, 인체 내에서 비타민 D가 형성되는 과정 등 지구 상의 생명체가 그 생명을 유지하기 위한 여러 현상들을 아직도 우리는 그 상세한 과정을 잘 모른다고 할 수밖에 없다. 태양 빛이 광합성을 담당한 분자에 비쳐질 때, 분자 내에서의 전자와 태양광 간의 상호작용(coupling), 다음으로는 이 전자들과 원자들 간의 상호작용, 그리고 결정적으로 이 에너지가 어떻게 분자 내에 저장되는가에 대한 과정을 이해할 수 있다면, 기존의 태양전지보다 효율이 월등한 새로운 형태로 태양에너지를 저장할 수 있게 된다. 결론적으로, 전자의 들뜬 상태를 이해하고 이를 조종할 수 있는 분자동역학(molecular dynamics)은 아직도 이해해야 할 부분이 너무나 많다. 그 이유는 이런 과정을 검증할 수 있는 원자 수준의 공간 분해능과 펨토초 수준의 시간 분해능을 동시에 가진 실험 도구가 제대로 없었기 때문이다. 4세대 방사광은 다음과 같은 실험 기법을 통하여 이런 연구를 가능하게 해 줄 것이다.

- Dynamic molecular reaction microscopy(분자 반응 동역학 현미경) : 시간에 따른 분자반응을 X-선 분석을 통해 이미징화
- Time-resolved photoemission spectroscopy(시간분해 광전자 분광학) : 시간에 따른 물질의 전자구조 분석
- Time-resolved hard X-ray scattering(시간분해 경 X-선 산란) : 시간에 따른 물질의 원자 수준의 구조 분석
- Nonlinear X-ray spectroscopies(비선형 X-선 분광학) : 비선형 X-선 광학에 기인하는 물질과 X-선의 상호작용의 새로운 채널, 즉 고차항을 이용한 최첨단 분광학

### 새로운 차원의 물성 분석과 다양한 물질에서 자극과 반응(Pump-and-Probe)에 대한 연구

기존의 3세대 방사광가속기는 방사광이 연속적으로 방출되기 때문에 대부분의 경우 시료가 평형상태(equilibrium state)로 유지된다. 이런 실험의 결과는 평형상태의 시료를 분석한 것이다. 그러나 4세대 방사광은 그 특성상 방사광이 발생하는 순간을 정확하게 알 수 있다. 따라서 4세대 방사광이 시료에 닿기 직전, 별도로 설치된 광학 레이저를 이용하여 시료의 상태를 바꿀 수 있으며(pump), 이런 자극으로 들뜬 시료가 시간에 따라 변화하는 여러 과정, 즉 물질의 원자, 전자, 화학적 결합상태 등의 변화를 펨토초 분해능으로 정확하게 측정(probe)할 수 있다. 촉매가 화학 반응에서 어떤 형태로 작용하는 지에 대한 연구에도 이 방법을 적용하면 보

다 효율적으로 연구할 수 있다. 한편, 나노 스케일에서 각종 비평형 상태의 시료에 대한 열전달, 위상 변화, 동력학적 반응 등을 연구할 수 있으며, 이로부터 양자물질에 대한 새로운 현상을 찾고, 이를 보다 잘 이해할 수 있을 것이다. 이 분야에서 예상되는 새로운 실험 기법은 다음과 같다.

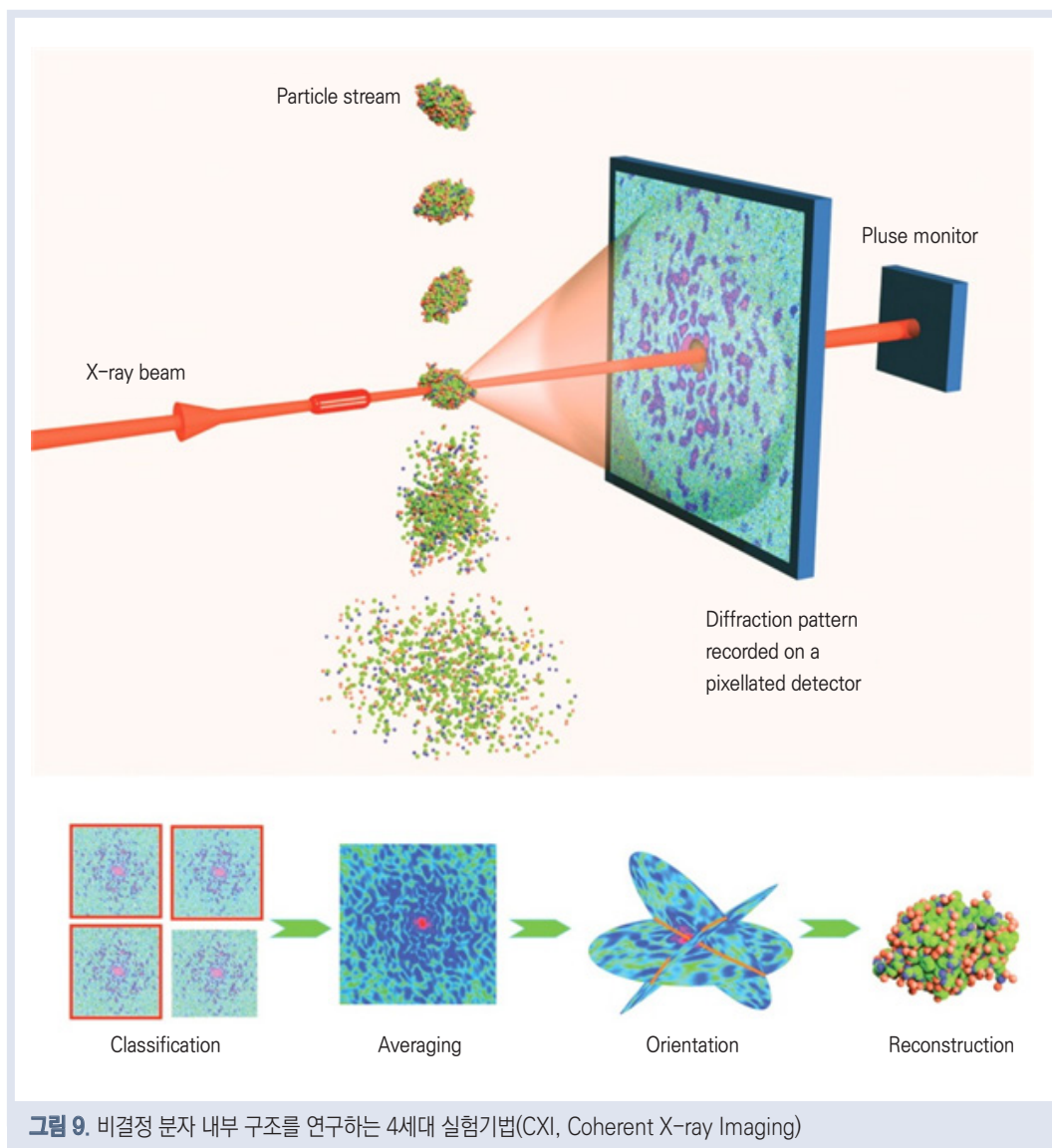
- Time-resolved and high resolution resonant inelastic X-ray scattering(시분해 & 고정도 공명 비탄성 X-선 산란) : 응집물질계 내의 다양한 여기 상태(excited state)<sup>vi</sup> 연구
- Time- and spin-resolved X-ray photoemission(시분해 스핀분해 X-선 광전자 분광학) : 시분해와 전자 스핀성분까지 분석 가능한 물질계의 전자구조분석
- X-ray photon correlation spectroscopy(X-선 광자 상관 분광학) : 시간차의 함수로 측정된 X-선 Intensity 상관함수를 통해서 물질 내부의 특성 규명

### 비결정 물질의 이미징 (Single Molecule Imaging)

4세대 방사광이 기존의 3세대 방사광과 비교하여 가장 크게 다른 점은 바로 결이 맞는(coherent) 빛이라는 점이다. 결맞음이란 발생하는 빛의 위상이 일치함을 의미하며, 레이저의 가장 큰 특징이다. 레이저가 발명된 이후, 아주 중요한 연구 도구로 발전되었으며, 지금은 일상생활 속에 깊이 들어와 있다. 그러나 기존 레이저는 그 파장 영역이 가시광선에서 크게 벗어나지 못하여, 분자나 원자를 직접 볼 수는 없었다. 원자를 직접 볼 수 있는 X-선 영역에서, 과학자들로부터 결이 맞는 빛에 대한 요구가 나오게 된 것은 아주 당연하였으며, 이에 부응한 결과가 바로 4세대 방사광이다. 기존의 광원은 X-선의 파장만 알 수 있으므로 시료는 내부 구조가 규칙성을 가진 결정 구조이어야만 분석할 수 있었다. 그래서 이 분야를 결정학(Crystallography)이라고 한다. 그러나 4세대 방사광의 경우, 빛은 파장뿐 만 아니라 모든 위상이 같으므로, 연구 대상인 시료가 규칙성이 반복되는 결정일 필요가 없게 되었다. 원리적으로 그리고 궁극적으로 시료를 지난 빛의 회절 정보만으로 시료의 내부 구조를 알 수 있게 된다. 그러나 실제 상황은 이와 사뭇 다르다. 4세대 방사광의 세기가 아주 강력하므로 빛을 이루는 전자기파의 전기장과 자기장 성분이 매우 크다. 따라서 이 빛이 시료에 닿으면 강력한 전기장에 의해 형성된 쿨롱(Coulomb) 전위가 시료를 즉각적으로 파괴한다. 그렇기 때문에 4세대 방사광의 펄스 폭이 길다면 시료를 지나는데 걸리는 시간이 길어져 결국 전위에 의해 파괴된 시료 밖에 볼 수 없다. 4세대 방사광으로 비결정 시료의 내부를 알려면 Coulomb 전위에 의해 시료가 파괴되기 전에 빛이 시료를 통과하여야만 한

vi) 원자 또는 분자가 외부에서 빛, 방사선 등에 의해 에너지를 흡수하여 궤도 전자의 에너지 준위가 상승한 상태.

다. 이 시간이 수 펨토초 이내이어야 하므로, 이 시간보다 짧은 펄스 폭을 가지는 4세대 방사광 만이 비결정 물질의 내부 구조를 알 수 있게 된다. 이 과정이 <그림 9>에 잘 표현되어 있다.



출처: CFEL Science 홈페이지(<https://desy.cfel.de/cid/>)

좀 더 현실적인 측면에서 보면, 과학자들은 연구 대상인 시료를 결정으로 만들기가 점점 더 어려워지고 있다. 특히 생명과학에서 아주 중요한 분야인 유전자와 관련된 시료는 만들기도 어렵고 그 크기도 매우 작아 나노 크기의 미소결정체가 대부분이다. 이 경우 4세대 방사광의 결맞음 빔을 수 나노미터 크기로 집속하여 비슷한 크기의 미소결정에 비추면, 기존의 결정학적인 방법을 빌려 미소결정의 내부 구조를 파악할 수 있게 된다. 이 분야를 이끌 새로운 실험 기법은 다음과 같다.

- **Serial Femto-second Crystallography(연속 펨토초 결정학)**: 같은 종류의 새로운 시료를 연속적으로 주입하면서 결정구조를 분석
- **Coherent X-ray Imaging(CXI)(결맞음 X-선 이미징)**: 결맞음 특성을 이용해서 회절패턴으로부터 바로 위상 정보 복구 알고리즘을 통해 실공간 이미징을 구현

## 07 빔라인장치

앞에서 설명한 주요 이용분야를 지원하기 위하여 4세대 방사광가속기 구축예산으로 경 X-선(0.1-nm) 삽입장치 라인 1기와 연 X-선(1~3 nm) 삽입장치 라인 1기 등 모두 2 기의 삽입장치 라인을 구비하였다. 각 삽입장치 라인에 여러 개의 end-station이 준비되어 이용자들의 다양한 요구를 충족시킬 수 있을 것이다.

### 경 X-선(HX, Hard X-ray Beamline)

5~20 keV 영역의 광자에너지를 가진 방사광을 제공할 경 X-선 빔라인은 장치 구성에 따라 UH(Undulator Hall), OH(Optics Hall), 그리고 EH(Experimental Hall)로 구분할 수 있다. UH/OH 내부에는 주요 광학장치인 거울(mirror)과 double crystal monochromator(DCM)<sup>vii)</sup>가 설치되어 있으며 이미 정렬이 완료되었다. 그리고 방사선 안전과 연관된 각종 collimator<sup>viii)</sup> 및 안전셔터(safety shutter)는 물론 냉각수(LCW), 각종 전원 및 케이블트레이, 압축공기 배관 등의 유틸리티 공사 역시 완료되었다. 가속기가 가동 중에는 이 지역의 출입은 철저히 통제된다. 이용자들이 실험을 수행하게 될 경 X-선 EH에는 두 개의 실험 허치(HEH-1, HEH-2,

vii) 결정을 이용해 백선 X-선을 단색화하는 장비

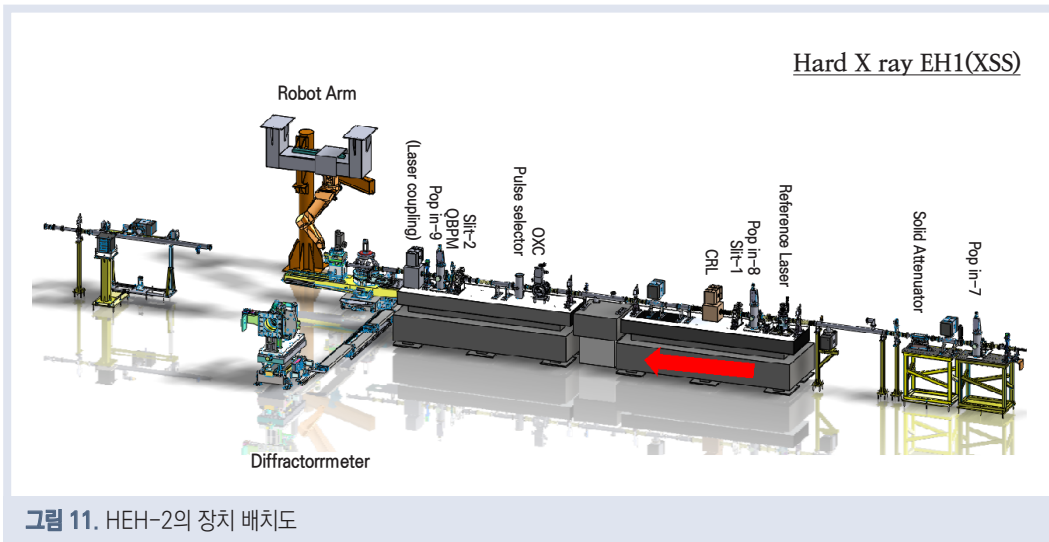
viii) 안전하지 않은 방향으로 진행하는 전자빔 또는 광자빔을 차단시키는 장치

HEH=Hard X-ray Experimental Hutch)가 앞뒤로(tandem) 배열되어 있다. HEH-1(yellow hutch: <그림 10>)은 경 X-선 pump-probe 실험을, HEH-2(red hutch)는 구조생물학 및 imaging 실험을 수행하기 위한 실험장치들로 구성되어 있다. 기술적인 면에서 HEH-1에서 사용될 기기들은 광학적 반사를 이용하는 실험들을 지원할 수 있다. 따라서 초기 단계에서 Bragg coherent diffractive imaging(BCDI)과 시분해 X-선 용액산란실험(time resolved X-ray solution scattering: TRXSS) 등을 비롯한 다양한 pump-probe 실험에 주안점을 두고 <그림 11>과 같이 설계되었다. 광학장치 정렬을 효율적으로 수행하기 위해 빔 다중 전송시스템의 뒤에 레퍼런스 레이저가 설치된다. 자유전자 레이저 빔의 위치 및 세기를 측정하기 위해 빔위치측정장치 (beam position monitor: BPM) 및 빔강도측정기 (profile intensity monitor: PIM)가 각각 설치되었다. 광학 레이저와 자유전자 레이저의 도달시간 오차는 레이저-X선상관기 (optical-laser and X-ray correlator: OXC)에 의해 fs 시간 해상도로 측정된다. 또한, 고속 X-선 셔터 역할을 하는 펄스선별기 (pulse selector)가 설치되어 실험 허치로 유입되는 4세대 방사광 펄스 중 선별적으로 필요한 펄스만을 시료에 조사시킬 수 있도록 한다. 베릴륨굴절렌즈(Be compound refractive lens: Be-CRL)는 XFEL 빔의 집속을 위한 광학장치이다. 두 세트의 Be-CRL가 X-선 자유전자 레이저를 집속시키기 위해 사용된다. X-선 자유전자 레이저의 빔 크기를 정의하고 최적화하기 위한 슬릿 (slit) 시스템은 총 3개로 Be-CRL 전후로 각각 2개, 1개가 위치한다. 이용자의 다양한 실험 조건을 충족시키기 위한 헥사포드(Hexapod Diffractometer)와 극저온 실험을 위한 4축방위계(4-Circle Goniometer)가 시편의 위치 및 각도를 정밀 조정하기 위해 설치되어 있다. 또한, 시편으로부터 발생한 신호를 측정하기 위한 검출기의 정밀 제어를 위한 로봇암이 설치되어 있다.



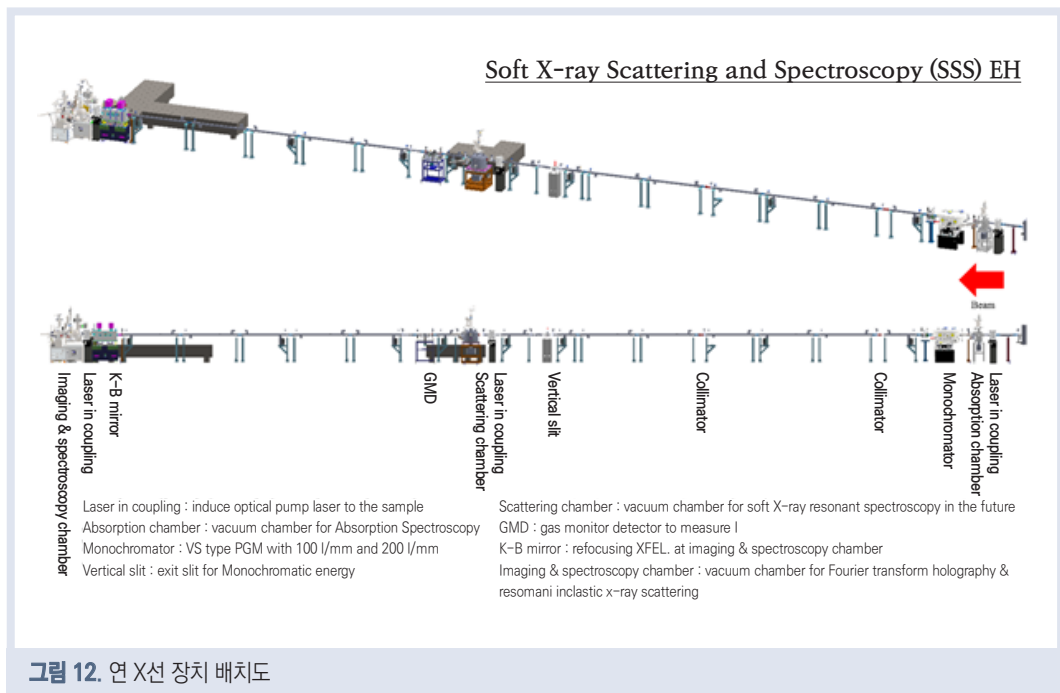
**그림 10.** HEH-1 내부 전경. 오른쪽에 검출기가 설치될 로봇 팔과 시료가 놓일 헥사포드가 보인다.

HEH-2<그림 11>는 전방산란기하학(Forward scattering geometry or transmission geometry)을 기반으로 구성된 실험장비가 구축되며, CXI(Coherent X-ray Imaging)와 SFX(Serial Femtosecond Crystallography) 등과 같이 물질의 구조 규명을 기반으로 하는 연구가 수행될 예정이다. 뿐만 아니라 광학 레이저 등을 활용한 시분해 연구의 수행이 가능하며, 물질의 구조적 변화를 직접적으로 관찰할 수 있게 된다. HEH-2에서는 K-B mirror를 이용하여 2- $\mu\text{m}$  크기로 X-선 빔을 집속하여 사용하게 된다. 집속 전후 및 시료 위치에서의 광자빔 진단은 다수의 진단장치(Pop-in, QBPM, photo diode 등)를 이용하여 자체적으로 수행하게 된다. 집속된 광자빔에 조사된 시료는 측정 후 바로 파괴되기 때문에 광자빔 발생 주기(60Hz)에 맞게 시료를 지속적으로 제공하여야 하며, 이를 위해 CXI와 SFX 연구에 특화된 시료챔버가 따로 제작되어 최적의 시료 환경을 제공할 예정이다. CXI 시료챔버는 고정 시료를 빠른 속도로 제공하여 시분해 연구를 할 수 있도록 고속의 샘플제공 시스템을 구비할 예정이며, SFX 시료챔버는 생체 고분자의 시료 환경을 맞추기 위한 시료 인젝터(liquid injector)가 개발되었다. 또한 시료파괴가 바람직하지 않은 실험의 경우 고성능 광자빔감쇄기를 이용하여 비파괴 실험환경을 구현할 수도 있다.



### 연 X-선(SX, Soft X-ray Beamline)

경 X-선 빔라인과 달리 250~1300eV 영역의 낮은 광자에너지빔을 제공할 연 X-선 빔라인은 해당 에너지 영역에서 펄스 당 광자수가 1012개 이상의 강력한 세기를 가지며, 펄스의 시간폭이 약 90 fs (full width at half maximum: FWHM) 정도가 되는 양질의 광자빔을 제공할 예정이다. OH에는 광자빔 세기를 조절할 수 있는 가스조절기 (gas attenuator: GA), GA 양쪽에 위치하여 광자빔 세기를 측정할 수 있는 강도측정기 (gas monitor detector: GMD), 불필요한 방사광을 차단시키는 거울 (offset mirror)이 설치되었다. 또한 실험홀 (EH)에는 <그림 12>과 같이 각종 부품이 배치되며 실험장치로 Endstation 1과 2가 설치된다. Endstation-1에는 회절이미징 (coherent diffraction imaging: CDI), X선발광/흡수분광기 (X-ray emission and absorption spectroscopy: XES/XAS), X선광전자분광기 (X-ray photoelectron spectroscopy: XPS) 등의 다양한 요구조건을 만족하는 시료챔버가 구비된다. Endstation-2에는 연 X선 공명산란 (soft X-ray resonant scattering: SXRS) 실험장치가 설치될 예정이다. EH의 뒤쪽에는 광학 레이저실이 설치되어 있다.



## 검출기(Detectors)

4세대 방사광은 3세대 방사광과 빔 특성이 크게 다르다. 특히 빛의 세기가 획기적으로 강하고 간섭성이 높기 때문에 검출기는 counting<sup>ix</sup> 방식이 아닌 integrating<sup>x</sup> 방식을 이용하고, 광자 1개부터  $10^4$ 개 이상까지 처리할 수 있도록 작동범위(dynamic range)가 넓어야 한다. 이러한 검출기의 도입은 2단계로 나누어 추진되고 있다. 검출기의 성능뿐만 아니라 시운전 일정과 현재 진행 중인 검출기 개발 일정 등을 고려하여 선정된 1단계 검출기는 영국 E2V사의 MPCCD(MultiPort Charge Coupled Device) 검출기로 0.5-M 픽셀 검출기 2기와 1-M 픽셀 검출기 3기로 구성되어있다. 이 검출기들의 유지 보수를 위하여 clean room 시설을 갖춘 검출기실이 EH 주위에 마련되었다. <그림 13>는 1-M MPCCD 검출기의 센서 및 신호처리 보드가 있는 카메라 헤드와 0.5-M 픽셀 센서 두 개가 조립되어 있는 모습을 보여주고 있다.

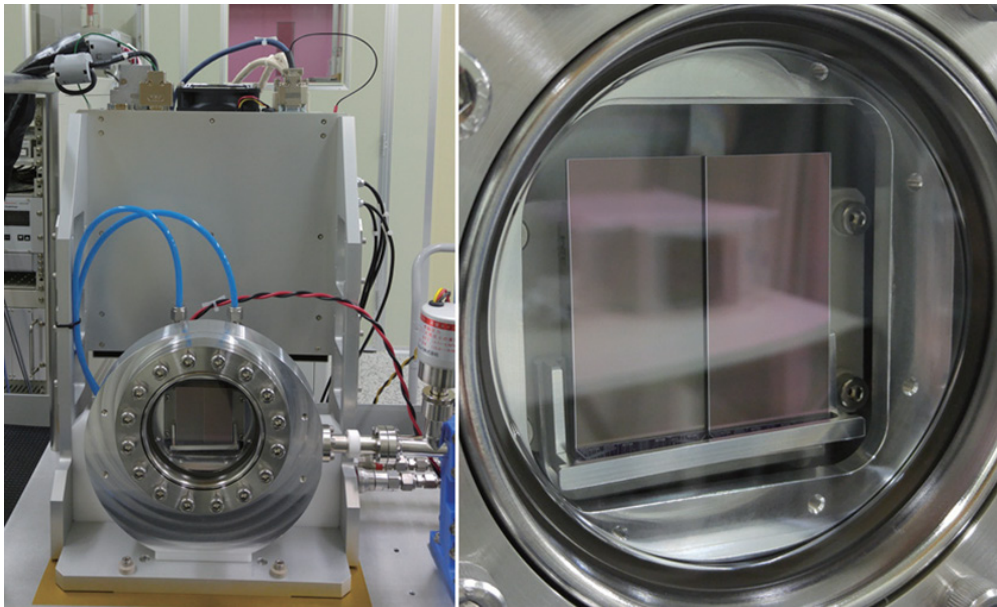


그림 13. 1-M MPCCD 검출기 카메라 헤드(좌)와 센서 윈도우(우)

ix\_ 임계 값보다 큰 에너지를 가진 모든 광자의 수를 세는 검출기로, 신호처리 시간 내에 매우 많은 광자가 동시에 통과하는 경우에도 한 개의 광자로 인식

x\_ 입사되는 광자에 의해 만들어지는 전하를 집적하여 그 신호의 크기를 측정하는 검출기로, 동시에 여러 개의 광자 측정 가능

향후 2단계 검출기로 가장 유력한 후보는 스위스 PSI에서 최근에 개발이 완료된 JUNGFRAU(adjUstiNg Gain detector FoR the Aramis User station) 경 X-선 검출기로, 이를 도입하기 위한 협업의 추진 등에 앞서 JUNGFRAU의 1-D 버전인 GOTTHARD(a Gain Optimizing microTrip sysTem with Analog ReaDout) 검출기를 우선적으로 도입하였다. GOTTHARD 검출기는 50- $\mu\text{m}$  간격의 1,280 채널로 이루어진 실리콘 스트립 센서로 구성되어 있다. 연 X-선의 경우, 1단계 검출기는 PI-MTE2048B 등 상용 검출기를 우선적으로 사용하고, 2단계에는 PERCIVAL(Pixelated Energy Resolving CMOS Imager, Versatile and Large) 검출기가 도입될 예정이다. 이를 위해 PAL은 2014년부터 PERCIVAL 국제 공동 연구개발 그룹에 참여하여 함께 연구를 진행 중이다. 다양한 센서 구조와 ADC(Analog-to-digital converter)로 구성된 시제품을 이용하여 노이즈 및 클러스터링 등 최적화된 성능을 보여주는 센서 및 ADC 타입이 결정되었고, 이를 바탕으로 개선된 2-M 픽셀 센서의 제작이 2016년 말에 완료되었다. 현재 2-M 검출기 시스템을 이루는 센서, 신호처리 보드, DAQ 보드 등을 테스트하는 연구가 진행 중이며, 2017년 상반기에 전체 시스템의 조립과 테스트가 이루어질 예정이다. 2-M 픽셀 PERCIVAL은 2017년 하반기에 도입되어 2018년 중반부터 유저서비스에 사용될 예정이다.

## 08 전망

포항방사광가속기(PLS) 건설은 20세기 한국과학기술사의 톱(Top) 10에 선정되어 한국과학기술사에 한 획을 그은 큰 업적이었다. 이는 비단 방사광가속기의 활용 측면만 아니라 우리나라 과학기술발전 전반에 미친 파급효과 면에서도 그 의미가 매우 큰 것이다. 하지만 이런 연구 설비를 가지고도 지금까지는 남을 따라가는 연구가 거의 전부였다고 하여도 무방하다. 그리고 연구진의 규모도 대학 교수와 몇 명의 포스닥, 학생들로 구성된 소규모 팀으로도 3세대 방사광 관련 연구를 수행할 수 있었다. 그러나 4세대 방사광 관련 연구의 경우는 전문분야 간의 협력이 이루어지지 않으면 연구 자체를 수행할 수 없다. 통상적인 4세대 실험의 경우 시료 준비 및 제작, 시료 injection, 펌프 레이저 가동, fs-timing 동기, 데이터 측정 및 수집, 검출기 및 빔라인 운영, 데이터 분석 등의 전문분야로 나누어지며, 해당 전문가 50명 이상으로 이루어진 대규모 연구집단이 한 실험을 수행한다. 이중 일부 전문가 집단은 포항가속기연구소(PAL)가 확보하고 있지만 전문성과 인력 측면에서 충분하지 않다.

세계에서 3번째인 4세대 방사광가속기 PAL-XFEL의 준공으로 우리나라는 지금부터 과학 선진국들을 뒤쫓아갔던 연구에서 벗어나 우리만의 독창적인 연구가 가능할 수 있는 중요한 기로에 서 있다. 우리가 이 기회를 제대로 활용할 수 있다면 아직 실용화되지 않은 -- 그래서 꿈의 빛으로 불리는 -- 4세대 방사광 분야에서 세계를 선도하는 성과를 얻을 수 있게 될 것이다. 4세대 방사광을 통하여 지금까지 알려진 분야보다 훨씬 더 많은 활용분야가 앞으로 등장할 것임에 틀림없다. 따라서 PAL-XFEL은 우리나라 융합연구의 대표적인 시험장(test ground)이자 운동장(playground)이 될 것이다. 가까운 미래에 PAL-XFEL이 우리와 우리 후손에게 새로운 먹거리와 산업, 그리고 인간의 삶의 질을 향상시키는 새로운 성과로 보답하는 날이 올 것을 기대한다.

## 저자 고인수

In Soo Ko

**학 력** UCLA 플라스마 물리학 박사  
서울대학교 물리학 석사  
서울대학교 응용물리학 학사

**경 력** 現) 포항공과대학교 첨단원자력공학부 교수  
現) 4세대방사광가속기 구축추진단 단장  
前) 포항가속기연구소 소장

## | 참고문헌 |

---

1. Linac Coherent Light Source (LCLS) Conceptual Design Report, SLAC-R-593, April (2002)
2. Experimental X-Ray Studies of Liquid Surfaces, PhD Thesis Harvard University, December (2003)
3. Femtosecond x-ray science, IOP Publishing, January (2006)
4. The European X-ray Free-Electron Laser Technical Design Report, DESY 2006-097, July (2007)
5. SwissFEL Conceptual Design report, PSI Bericht Nr. 10-04, July (2010)
6. PAL-XFEL Technical Design Report, April (2013)
7. New Science Opportunities enabled by LCLS-II X-ray Lasers, SLAC-R-1053, June (2015)

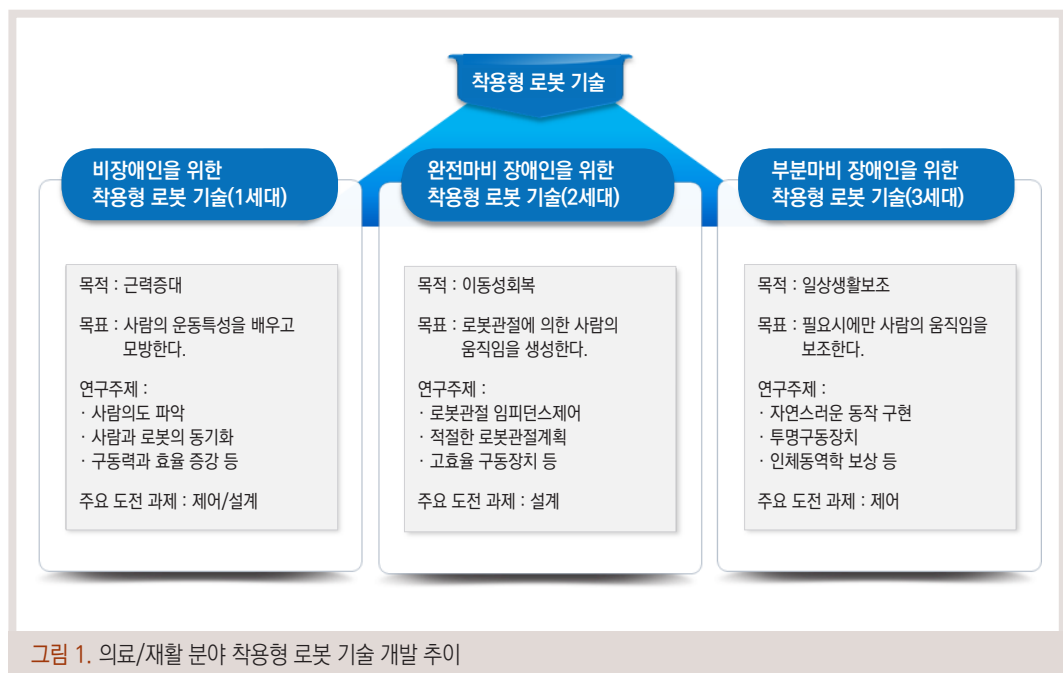
## 02

# 과학을 넘어 기적으로 장애인용 착용형 로봇

서강대학교 기계공학과  
공경철 교수(kckong@sogang.ac.kr)

# 01 서론

착용형 로봇(Wearable Robot)은 인간의 팔이나 다리의 움직임을 감지하여 구동기가 장착된 로봇 팔이나 다리를 움직여 인간의 움직임을 보조하고 힘을 증폭시키는 로봇을 말한다. 착용형 로봇 기술은 착용자의 상태와 목적에 따라 크게 3가지로 분류할 수 있다(그림 1).



1990년대와 2000년대 초반에 착용형 로봇은 대부분 노동자나 군인처럼 비장애인의 물리적 부담이 가해지는 작업을 보조하기 위한 수단으로 연구되기 시작하였다. 비장애인을 위한 착용형 로봇의 경우 근력을 증대시키기 위한 기술들이 사용되며, 대표적으로 사람의 운동특성을 학습하고 모방하는 행동 의도 파악기술이 포함된다. 하지만 비장애인용 착용형 로봇은 착용자의 동작과 로봇의 동작을 구별하기 어려워 효과적인 제어성능을 도출하기 힘들다.

이후 착용형 로봇 기술은 착용자의 동작을 구별할 필요 없이 로봇관절에 의해 사람의 움직임을 생성하는 완전마비 장애인을 위한 기술 개발이 시도되었다. 하지완전마비 장애인을 위한 착용형 로봇 기

술의 경우 로봇의 제어시스템이 일방적으로 착용자의 동작을 만들어 내기 때문에 제어 난이도는 상대적으로 낮으며, 이미 미국에서 성공적으로 상용화된 사례가 있다.

최근에는 약화된 근력으로 인해 보행안정성이 저하되어 거동이 불편한 하지부분마비 장애인의 일상생활보조를 위한 착용형 로봇이 활발하게 개발되고 있다. 노약자를 포함한 부분마비 장애인을 위한 착용형 로봇은 필요시에만 사람의 움직임을 보조해야하기 때문에 비교적 높은 제어 성능이 요구된다. 늘어나는 노인과 부분마비 장애인 인구에 따라 이들의 보조 및 재활을 위한 착용형 로봇의 개발이 세계 곳곳에서 진행 중에 있다.

## 02 1세대: 비장애인의 근력증강을 위한 착용형 로봇 기술

비장애인을 위한 착용형 로봇은 고출력의 구동기를 사용하여 착용자의 근력을 증가시켜 다양한 업무에서 효율성을 증가시킬 수 있다. 비장애인을 위한 착용형 로봇은 군사용(개인 전투체계), 재난대응(재난현장 위급상황 긴급 대응), 산업용/건설용(고중량물 취급 및 반복 작업성 증대)등 다양한 분야에서 적용을 시도하고 있다.

군사 분야는 착용형 로봇 시장에서 가장 역동적인 분야로, 공개된 바로는 미국, 중국, 캐나다, 한국, 영국, 러시아 및 호주에서 개발되어 테스트가 진행 중이며, 공개 되지 않은 곳에서도 군사용 착용형 로봇 개발 프로젝트가 다수 진행 중 일 것으로 예상 된다. 특히, 군사 분야는 시장 잠재성이 매우 클 것으로 기대되며, 미국 Lockheed Martin사의 HULC(Human Universal Load Carrier)가 대표적이다.

산업 분야는 착용형 로봇 시장 중 가장 빠르게 성장하고 있는 분야로 건설 현장, 건물 부두, 공장, 창고 및 수술실에서 일과 산업을 위해 많이 사용될 것으로 기대된다. 미국의 Lockheed Martin사는 산업현장의 무거운 공구나 물체를 지탱해주는 착용형 로봇 FORTIS를 개발하여 판매하고 있으며, 스위스의 Noonee사는 공장의 작업자들이 편한 자세에서 작업할 수 있게 도와주는 착용형 로봇 Chairless Chair를 개발하여 테스트가 진행 중이다. 해외뿐만 아니라 국내에서도 현대자동차그룹,

한국생산기술원, 대우조선해양 등에서 산업용 착용형 로봇을 개발하고 있다.

※ 비장애인을 위한 착용형 로봇은 지난(16년 12월호) 융합연구리뷰에 자세히 나와 있어, 본고에서는 장애인을 위한 착용형 로봇(2, 3세대)을 면밀히 살펴보고자 한다.



▶ HULC (Lockheed Martin, 미국)



▶ FORTIS (Lockheed Martin, 미국)



▶ Chairless Chair (Noonee, 스위스)



▶ HYPER R1 (한국생산기술원, 한국)



▶ H-WEX (현대자동차그룹, 한국)



▶ 강화외골격 (대우조선해양, 한국)

그림 2. 비장애인의 근력증강을 위한 착용형 로봇

## 03 2세대: 완전마비 장애인의 보행을 위한 착용형 로봇 기술

완전마비 환자의 경우 착용자 스스로 움직이는 것이 불가능하기 때문에 착용자의 움직임을 방해하는 착용형 로봇에 의한 기계적 저항을 고려할 필요가 없다. 때문에 완전마비환자를 보조하기 위하여 마스터(로봇)-슬레이브(사용자) 방식으로 제어함으로 출력과 저항력이 모두 큰 구동기가 효율적이다. 또한 그림 3에서 보듯이 하지완전마비 장애인의 경우 본인의 시각과 청각을 통하여 정보를 수집 할 수 있으며 상체는 비장애인과 동일하게 역할을 수행할 수 있다. 따라서 완전마비 착용자의 의도파악이 불가능한 상황에서 센서를 통하여 착용형 로봇을 구동하는 대신 사용자 인터페이스를 통하여 착용자가 직접 로봇에 명령을 내릴 수 있다. 이는 착용형 로봇의 외부 환경으로부터 잘못 감지된 센서 신호에 의한 사고를 방지하고 착용자가 동작에 대한 예비 자세를 취해 안정감을 높일 수 있다.



그림 3. 완전마비 장애인용 착용형 로봇

### 3.1 국제 장애인 로봇 올림픽 : 사이배슬론

착용형 로봇은 미국, 일본, 이스라엘 등 주요 국가가 기술을 선두하고 있다. 표준화가 이루어지지 않은 상태에서 각 연구소와 회사별로 고유의 원천기술 연구 개발에 집중하고 있으며, 광범위한 임상 시험이 진행 중이다. ReWalk Robotics의 경우 2014년 미국 식약청(US FDA)에서 최초로 가정용 착용형 로봇으로 승인 한 착용형 로봇을 가지고 있으며 현재 연간 100~140대 범위의 로봇을 판매하고 있다.

이러한 환경 속에서 2016년 스위스 국립로봇역량연구센터가 주최한 국제 사이보그올림픽인 사이배슬론(Cyathlon: Cyborg + athlon)이 열리며, 장애인들을 도와주는 착용형 로봇이 많은 관심을 받았다. 사이배슬론은 의공학 분야의 최고 기술을 겨루기 위해 만들어진 국제대회로써 뇌-기계인터페이스, 의족, 의수 등 여러 주제에서 다양한 세부 미션으로 이루어진 일종의 올림픽 형태의 경기이다. 따라서 의공학 분야에 있어서 세계 최고의 다양한 기술들을 한 자리에 모아 서로가 성능만으로 경쟁하는 대회라 할 수 있다. 이번 대회는 1회로서 2016년 10월에 스위스에서 진행되었고, 2회는 2020년 일본에서 개최될 것으로 알려져 있다.



(a) 사이배슬론 로고



(b) 스위스 아레나 경기장 (사전연습장면)

그림 4. 사이배슬론 대회



▶ 생각만으로 컴퓨터를 동작하는 뇌-기계 인터페이스 종목



▶ 완전마비 장애인의 근육에 전기자극을 주는 FES 자전거 경주 종목



▶ 휠체어로 장애물을 통과하는 기능성 휠체어 종목



▶ 완전마비 장애인이 장애물을 통과하는 착용형 로봇 종목



▶ 하지절단 장애인이 장애물을 통과하는 의족 종목



▶ 상지절단 장애인이 물건을 조작하는 의수 종목

그림 5. 사이배슬론 대회 종목

완전마비 장애인용 착용형 로봇 종목에는 우리나라 Tea m SG Mechatronics를 비롯하여 가장 긴 업력을 자랑하는 ReWalk, 재활보장구 분야의 세계최대 기업인 Ottobock, 미국 NASA의 후원을 받은 IHMC 연구팀을 포함하여 전 세계의 쟁쟁한 16개의 연구팀들이 서류심사를 통과했다. 그러나, 대회전 5개의 팀이 로봇 개발 과정에서 기권했고, 2개의 팀이 시합 직전에 기권했으며, 추가로 2개의 팀의료검사와 기술검사 부분을 통과하지 못했다. 결과적으로 오직 7개의 팀만 대회에 출전할 수 있었다.

- |                            |                   |
|----------------------------|-------------------|
| ▶ PolyWalk EPFL (스위스)      | ▶ IHMC (미국)       |
| ▶ ReWalk (독일)              | ▶ Neurowalk (러시아) |
| ▶ SG Mechatronics (한국)     | ▶ ROKI (멕시코)      |
| ▶ Varileg-ETH Zurich (스위스) |                   |

그림 6. 최종 출전 팀 명단

완전마비 장애인이 경기장에서 일반인에게도 버거운 장애물을 통과하는 모습이 여과 없이 실시간으로 전 세계에 생중계 되었다. 주어진 장애물은 앉기와 서기, 장애물 피하기, 앞 경사로와 문 열고 닫기, 징검다리 건너기, 옆 경사로, 계단오르내리기 등의 일상생활에서 마주하는 6가지 과제를 수행하는 방식으로 이루어졌다.

#### Powered Exoskeleton Race 미션 소개 및 도전과제



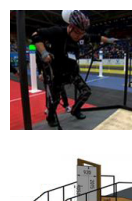
##### 앉기와 서기

정해진 규격의 "폭신한" 소파(Sofa)에 완전히 앉았다가 일어나야 한다. 경기에 사용되는 소파는 쿠션이 부드러기 때문에, 앉은 상태에서 몸의 중심이 완전히 뒤로 넘어가게 된다. 이러한 상태에서 균형을 회복하고, 선수와 로봇의 무게를 구동기의 힘으로 들어올리는 전략이 필요하다.



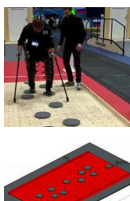
##### 장애물 피하기

일자로 서있는 4개의 장애물 사이를 지그재그로 통과하는 미션이다. 평지보행 중 급격한 방향전환이 가능하지가 매우 중요한 미션이며, 방향전환 시 균형을 유지하는 것이 중요하다.



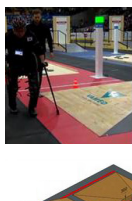
##### 앞 경사로와 문 열고 닫기

20° 경사의 오르막을 올라간 뒤, 손잡이를 조작하여 문을 여닫으며 통과하고, 15° 경사의 내리막을 내려오는 미션이다. 오르막과 내리막에서 지속적인 전후방 균형 유지가 가능해야 하며, 문을 여닫는 과정에서 한 손을 이용한 균형유지 및 크러치(목발) 조작이 도전적이다. 또한 문을 여닫는 과정에서 앞, 뒤, 옆으로 조금씩 움직이며 정확하게 손잡이를 다루기 위하여 미세한 움직임의 구현이 가능해야 한다.



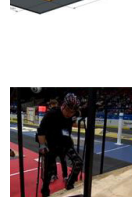
##### 징검다리 건너기

지면으로부터 30mm 높이에 위치한 지름 250mm의 징검다리 11개를 모두 밟으며 전진해야 하는 미션이다. 현재의 발을 딛고 있는 징검다리에서 다음 징검다리까지의 거리 계산 및 보폭 조절을 수행한다. 발이 징검다리 이외의 부분에 약간이라도 닿게 되면 실격처리 되므로 조금의 실수도 허락되지 않는 미션이다. 특히 2차례의 아주 큰 폭이 존재하는데, 이를 건너는 동안 균형을 유지하고 몸을 앞으로 나가도록 하는 것이 매우 도전적이다.



##### 옆 경사로

18°의 경사도를 갖는 오르막/내리막과 좌우로 10°의 경사도를 갖는 옆경사로가 복잡하게 구성된 미션이다. "앞경사로 통과" 미션과는 다르게 난간을 붙잡을 수 없어 지팡이(Crutch)만을 이용한 균형유지가 가능해야 하며, 잦은 보폭 변화, 양다리의 힘의 균형, 상체 자세 제어 등의 아주 다양한 도전적인 과제가 존재하는 미션이다. 특히 오랜 기간 휠체어를 사용하는 장애인들의 특성 상측면방향으로의 균형감각이 떨어지기 때문에, 로봇 뿐만 아니라 장애인 선수에게도 가장 도전적인 미션이다.



##### 계단 오르내리기

폭 280mm, 높이 170mm의 계단을 오르내려야 한다. 계단의 치수를 고려한 보행 동작 생성이 수행되며, 한 손을 이용한 지팡이(Crutches) 조작이 진행된다. 또한 계단을 오르고 내려갈 시에 최고 난이도의 전후방 균형유지가 필요하다.

그림 7. 완전마비 장애인용 착용형 로봇 종목 장애물

제한 시간 10분 안에 통과한 과제들의 점수를 합산하여 순위가 정해졌으며, 동점일 경우에는 과제를 더 신속하게 수행한 팀이 높은 순위가 됐다. 그림 8은 이번 대회에서 1,2,3등을 차지한 3팀이다.



(a) ReWalk Robotics(독일 1등)



(b) ihmc Robotics(USA 2등)



(c) Team SG Mechatronics(한국 3등)

그림 8. 사이배슬론 대회 수상팀

우리나라는 ‘Team SG Mechatronics(국내 벤처기업인 SG Mechatronics와 서강대, 세브란스 재 병원 의료진으로 구성)’가 국내 기술로 제작한 ‘WalkON(워크온 슈트)’를 기반으로 본 대회에서 3위를 차지하며 세계 최고의 연구팀들과 어깨를 나란히 했으며, 우리나라의 기술력을 전 세계에 알렸다.

### 3.2 관련기술

앞에서 언급한 워크온 슈트에 적용된 기술을 바탕으로 보편적인 완전마비 장애인용 착용형 로봇 관련기술을 소개하고자 한다.

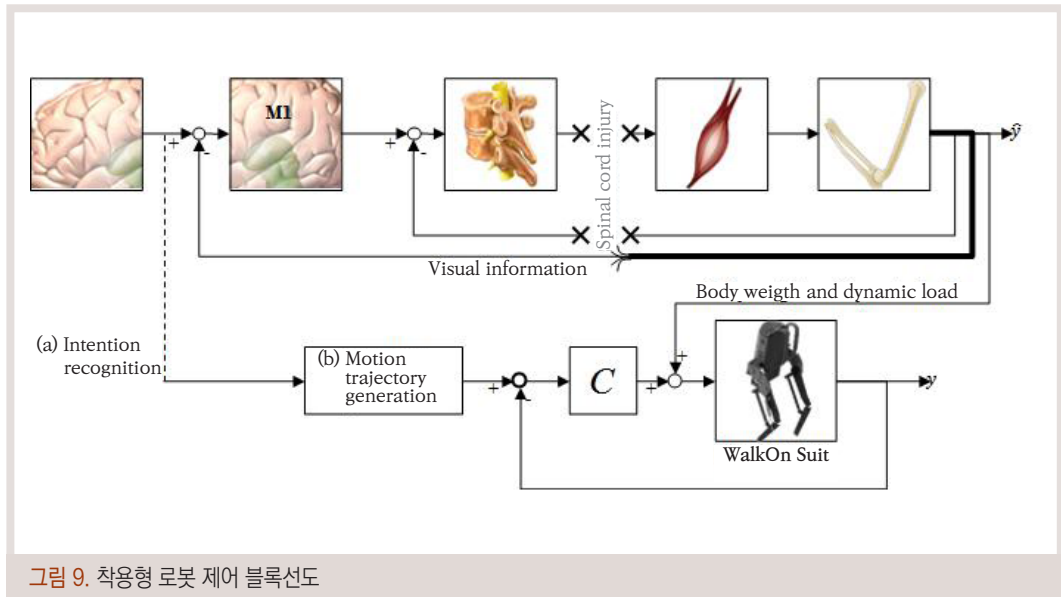


그림 9. 착용형 로봇 제어 블록선도

**그림 9**는 척수 손상(Spinal cord Injury)환자가 워크온 수트를 착용했을 때 적용되는 제어 알고리즘을 나타낸다. 각각의 블록은 사람의 뇌, 척수, 근육, 골격, 워크온 수트의 구동기(Motion trajectory generation), 제어기(C, Controller), 본체를 나타낸다. 그리고 각각의 블록을 연결한 선은 블록간의 신호를 전달 할 수 있는 연결 통로를 나타내며 화살표는 신호의 전달 방향을 나타낸다. 비장애인의 경우 척추 손상으로 인한 신호 전달 통로가 절단되어 있지 않아 인체는 시각정보(Visual information)에 의한 피드백으로 신체를 원하는 위치에 도달할 수 있고 촉각정보(sense of touch information)에 의한 피드백으로 원하는 힘을 낼 수 있다. 반면에 장애인의 경우 척수가 손상되어 뉴런이 완전히 절단되어 피드백 신호를 전달할 수 없기 때문에 신체를 움직일 수 없다. 결과적으로 하반신 완전마비 장애인의 경우 로봇에 의해서만 신체를 움직일 수 있다. 따라서 착용형 로봇의 피드백 제어는 외부에서 변칙적이며 지속적으로 받는 간섭에도 안정성을 유지해야하며, 착용형 로봇의 구조는 힘지에서도 착용자와 착용형 로봇의 무게를 견딜 수 있을 만큼 강해야 한다.

▶ 설계 기술 :

사람이 직접 착용을 하는 착용형 로봇의 설계는 착용자의 안전을 고려하면서 목표 성능을 낼 수 있는 설계기술이 필요하다. 완전마비 장애인용 착용형 로봇의 경우 사용자 디스플레이, 제어부, 배터리, 한 쌍의 로봇다리, 구동부, 지팡이(Crutch)로 이루어져 있다(그림 10).



**그림 11**에서 워크온 슈트 ver.1(이하 ver.1)은 처음으로 만들어진 워크온 슈트이다. ver.1은 구동부로부터 엉덩이 관절의 내전, 외전, 굽힘 및 신장과 무릎 관절의 굽힘 및 신장으로 이루어진 6자유도<sup>i)</sup>를 가지고 있으며, 빠른 관절 각속도<sup>ii)</sup>를 가지도록 제작하였다. 그러나 착용자의 훈련과정에서 구동기의 토크<sup>iii)</sup>가 관절부를 회전하기에 충분하지 않았으며, 훈련을 진행한 결과 착용자가 방향 전환을 할 때 엉덩이 관절의 내전과 외전의 구동력이 없어도 쉽게 방향 전환을 할 수 있었다. 발목관절 구동기는 로봇 무게를 증가시키는 것에 비해 보행 안정성은 크게 좋아지지 않았다. ver.1에서 얻은 정보를 적용하여 워크온 슈트 ver.2(이하 ver.2)를 설계 및 제작하였다. ver.2에 관절부 구동기를 추가하여 보행 시 부족한 회전력을 충분히 낼 수 있게 했고, 엉덩이 관절의 내전, 외전용 구동기와 발목관절용 구동기를 제거하여 로봇의 무게를 줄였다. 또한 여러 임상연구에서 사람이 앉고 서는데 필요한 무릎과 엉덩이 신장 토크는 119Nm 및 96Nm로 나타나, 워크온 슈트 ver.2의 성능을 이에 맞추어 설계·제작 하였다(표 1).



**그림 11.** 워크온 슈트

<sup>i)</sup> 독립적으로 변할 수 있는 매개변수의 수

<sup>ii)</sup> 물체가 회전하는 속도를 측정하는 물리량

<sup>iii)</sup> 물체에 작용하여 물체를 회전시키는 원인이 되는 물리량

▼ 표 1. 워크온 수트의 기계적 특성

WalkON Suit		version 1	version 2
Dimension [mm]	Height	1200	1400
	Width	500	550
	Depth	300	350
Weight [kg]		30	27
Degree of Freedom	Active	6	4
	Passive	2	2
Torque [Nm] (Continuous)	Hip	129	172
	Knee	116	168
Torque [Nm] (Peak)	Hip	550	740
	Knee	500	720
Torque [Nm] (Hybrid, Continuous)	Hip	129	172
	Knee	176	208
Speed [RPM]	Hip	33	33
	Knee	37	34
Range of Motion [deg.]	Hip	-30 ~ -120	-30 ~ 120
	Knee	0 ~ 100	0 ~ 115
	Ankle	-20 ~ 20	-20 ~ 20

완전마비 장애인은 오랫동안 휠체어를 사용하여 무릎관절과 발목관절의 운동범위가 비장애인과 비교하여 제한적이다. 따라서 착용형 로봇을 설계하고 보행궤적을 생성할 때 이를 고려하여 착용자가 부상을 입는 것을 방지해야한다.

착용형 로봇다리의 경우 착용자의 몸에 밀착되는 무릎 발목 발 보장구(이하 KAFO)를 이용하여 각각의 착용자에게 개인별 최적화를 통한 맞춤 설계를 했다. 또한 생체근육을 모방하여 무릎관절 구동기를 엉덩이 관절 위치로 이동시키고 구동기와 종아리를 링크로 연결한 이관절근 구동부 구조를 설계했다. 이는 무게중심과 회전중심을 가깝게 하여 로봇다리의 관성 모멘트를 줄일 수 있으며 이로부터 제어성을 높일 수 있다.

KAFO는 착용형 로봇과 착용자를 연결해주는 장치로 이용되었다. 완전마비 환자는 자발적인 근력을 낼 수 없으므로 착용형 로봇과 착용자가 완벽하게 고정되어 착용형 로봇의 구동력이 KAFO를 통하여 인체에 정확하게 전달되어야 안전한 보행을 할 수 있다. 워크온 수트는 착용자의 신체를 3-D 스캔하여 착용자의 몸에 정확하게 일치하는 KAFO를 설계했다.

지팡이의 경우 완전마비 장애인의 신체 균형 유지를 위하여 이용된다. 또한 지팡이 손잡이 부분에 스위치를 장착하여 착용형 로봇을 조종할 수 있는 사용자 인터페이스를 구성함으로 별도의 추가 장비 없이 착용자가 자연스럽게 착용형 로봇을 조종할 수 있게 한다. 그림 10에서 워크온 수트의 복부부분에 사용자 인터페이스 디스플레이를 설치하여 착용자가 워크온 수트의 현재 제어 상태를 확인할 수 있게 했다. 이는 착용자가 마주치는 여러 상황에 따라 알맞게 착용형 로봇의 제어 상태를 변경할 수 있게 한다.

#### ▶ 제어 알고리즘 :

워크온 수트는 착용자의 관절 운동범위와 회전속도 범위를 고려하여 안전하게 보행동작을 구현할 수 있는 제어알고리즘이 적용되며, 자연스러운 보행동작을 위해 보행단계가 변함에 따라 발생하는 진동을 감쇄하는 제어기술도 적용되었다. 사람의 보행은 보통 한쪽 발의 뒤꿈치가 지면에 닿은 후 다시 같은 발의 뒤꿈치가 지면에 닿는 때 까지를 한 주기로 하며, 한 주기는 입각기와 유각기 두 단계로 이루어져 있다. 입각기 단계란 지면과 발이 닿아 있는 사이를 말하며 유각기 단계란 지면과 발이 떨어져 있는 사이를 말한다. 보통 보행주기의 60%는 입각기 40%는 유각기 이다. 입각기 단계에는 착용자의 체중과 보행속도, 지면상태, 지팡이의 위치 등의 여러 조건으로 인해 변화하는 외란으로부터 안정성을 유지하고, 유각기 단계에는 신속하게 다음 궤적 위치로 로봇 다리를 이동하기 위해 보행단계에 따라 제어 계수가 달라지는 기술이 적용되었다.

워크온 수트는 지팡이의 스위치를 통해 착용자가 조종을 할 수 있다. 착용자의 조종 의도에 따라 다음 걸음발의 위치가 결정되고 보행 궤적을 위해 무릎관절과 엉덩이관절의 관절 궤적이 착용형 로봇다리의 역 기구학으로 계산된다.

계산된 무릎 관절각은 보행을 하는 동안 항상  $10^{\circ}$  이상으로 유지된다. 이는 완전마비 장애인의 무릎 관절각 제한 때문이다. 비장애인은 사람의 힘으로 자연스러운 보행을 하여 각 관절각 크기의 변화가 연속적인 사인곡선 파형을 가진다. 반면에 착용형 로봇은 구동기로 인위적인 보행궤적을 만들기 때문에 보행궤적이 준 정적이므로 정상보행 궤적과는 다른 보행궤적이 요구된다. 따라서 유각기 단계에서는 구동기를 통하여 착용자의 몸을 계속 전진시키고 입각기 단계에서는 큰 클리어런스를 보장하는 보행궤적을 적용했다.

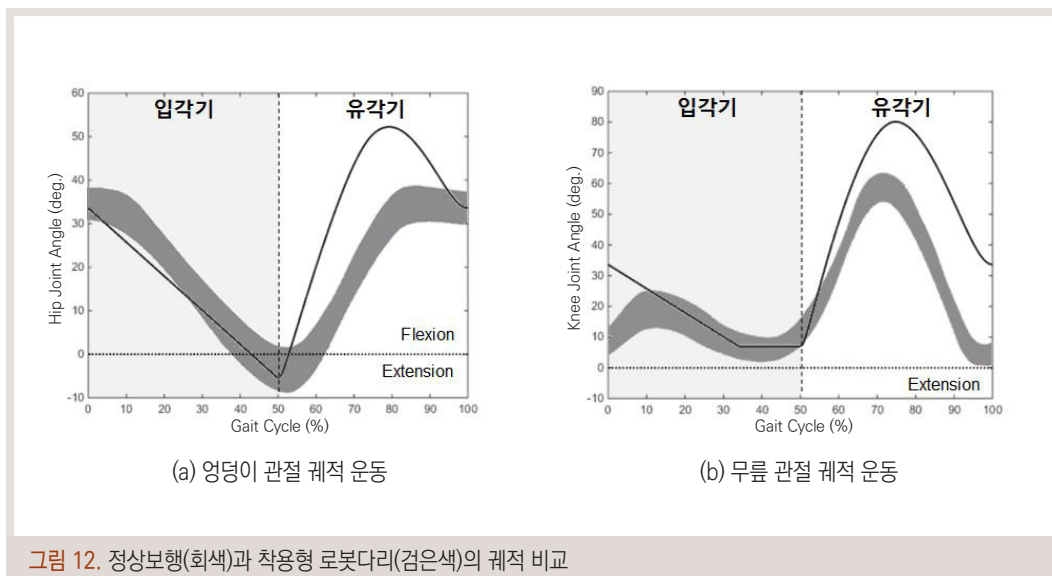


그림 12. 정상보행(회색)과 착용형 로봇다리(검은색)의 궤적 비교

완전마비 장애인용 착용형 로봇은 시동모드, 안전모드, 이동모드, 휴식모드, 종료모드로 총 5가지 작동모드를 가지고 있다.

- 시동모드 : 전원 스위치로 착용형 로봇이 작동 되었을 때 모든 기능이 정상작동하는지 확인하는 단계
- 안전모드 : 속도 및 작동 토크를 제한하여 로봇의 하드웨어 및 소프트웨어를 점검하는 단계
- 이동모드 : 착용자가 명령을 내려 로봇을 구동하는 단계
- 휴식모드 : 착용자가 로봇을 구동하는 중간에 휴식이 필요할 때 사용
- 종료모드 : 로봇의 모든 전원을 종료하는 단계

이 5가지 과정으로부터 착용자의 안전을 확보할 수 있다.

### ▶ 착용자 훈련 :

착용형 로봇은 로봇의 성능 못지않게 착용자의 로봇 조종 능력도 중요시 된다. 따라서 착용자가 로봇을 착용했을 때 적절한 훈련을 통하여 로봇을 안정적으로 조종할 능력을 갖출 수 있는 훈련 체계가 요구된다.

(a) 연습 초기

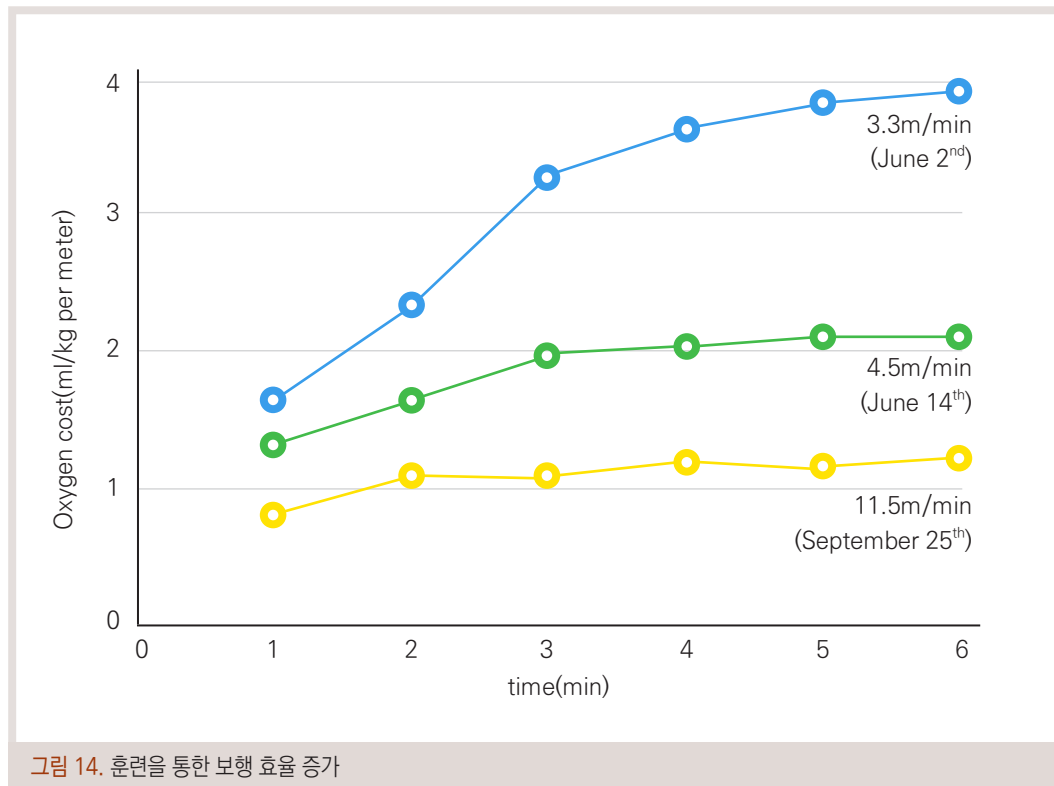


(b) 3달 후



그림 13. 훈련을 통한 보행로봇 조종 숙달

훈련 성과를 확인하는 방법 중 하나는 착용자의 산소 소모량을 측정하는 것이다. 측정결과 훈련 전 착용자의 산소 소모량은 비장애인의 산소 소모량보다 30배 많았지만 훈련을 하여 로봇 조종을 숙달한 후 산소 소모량이 약 25% 감소되는 것을 확인했다.



### ▶ 안전기준 :

착용형 로봇은 사람이 직접 착용하는 로봇이기 때문에 여러 가지 안전요건을 만족해야 한다. 아직 확정된 안전기준은 없지만 아래의 항목은 사이배슬론 대회와 요구사항이다.

**(1) 일반 안전 조치**

1. 정전기 방전(ESD, Electrostatic discharge) 보호가 충분한지 확인
2. 전자기 간섭(EMI, Electromagnetic interference) 보호가 충분한지 확인
3. 로봇의 소음이 85dB보다 작은지 확인
4. 착용형 로봇이 작동중인지 인식가능한 장치 확인
5. 착용자의 건강 및 자각에 문제를 발생시키는 0.5Hz와 80Hz 및 착용자의 멀미를 유발하는 0.1Hz와 0.5Hz 사이의 진동이 발생하지 않는지 확인
6. 유해 물질이 노출되었는지 확인
7. 극한의 온도에 노출되었는지 확인
8. 비상정지를 쉽게 인지하고 작동시킬 수 있는지 확인
9. 착용자의 인체에 닿거나 착용형 로봇 근처의 다른 사람에게 잠재적 장애물이 될 수 있는 느슨한 전선이나 케이블이 없는지 확인
10. 저장된 에너지의 통제되지 않는 방출로 인하여 장치 상태가 안전하지 않은 상황이 발생하는지 확인
11. 구동부가 외부로 노출되어있지 않은지 확인
12. 잠재적 장애물이 없는지 확인
13. 지팡이 등의 주변 보조도구가 착용형 로봇이나 착용자에게 작동 중에 분실되지 않는지 확인
14. 헬멧 등의 안전장비가 착용형 로봇과 착용자를 방해하지 않는지 확인
15. 착용형 로봇이 작동 중 외부의 간섭으로부터 안전한지 확인

**(2) 에너지 저장 및 전자부품 관련 안전 사항**

1. 배터리 상태가 표시되는지 확인
2. 배터리가 고정되어있으며 안전하게 보호되는지 확인
3. 배터리가 착용자와 접촉되지 않는지 확인
4. 작동중인 배터리 단자에 접촉이 불가능한지 확인
5. 전기 부품이 커버가 씌워져 있고 절연되어 있는지 확인
6. 에너지원은 커버가 씌워져 있고 고립되어 있는지 확인
7. 에너지원을 쉽게 식별가능한지 확인
8. 착용자가 방열부품에 접촉되지 않는지 확인
9. 방수 기능이 있는지 확인
10. 최대 전압이 50V를 넘지 않는지 확인

### (3) 시동 및 종료 관련 안전사항

1. 로봇이 안전모드에서 시동되는지 확인
2. 안전모드에서 속도와 힘이 제한되는지 확인
3. 수동모드가 되기 전까지 로봇이 안전모드를 유지하는지 확인
4. 갑작스러운 전원의 꺼짐 현상으로부터 안전한지 확인

### (4) 로봇 설계관련 안전사항

1. 전원이 공급되지 않아도 로봇이 안정한지 확인
2. 로봇의 구동되어도 안전한지 확인
3. 착용자가 로봇을 입고 벗을시 안전한지 확인
4. 충돌 또는 충격으로부터 안정한지 확인
5. 장착 또는 부착 장비가 인체공학적인지 확인
6. 날카로운 외부면이 없는지 확인
7. 인체의 일부가 로봇에 끼지 않는지 확인
8. 부품의 분리 및 작동 시 로봇의 마모 또는 절단이 발생하지 않는지 확인
9. 로봇이 인체공학적인지 확인
10. 착용자의 시야를 제한하지 않는지 확인
11. 모든 구성요소가 올바르게 결합되어 있는지 확인

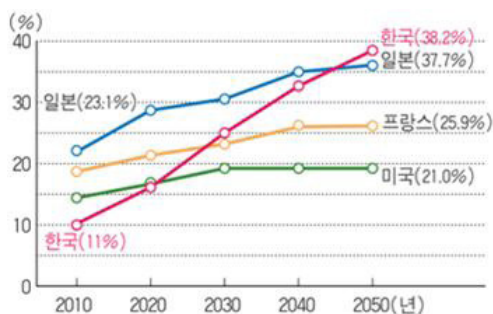
### (5) 착용자와 착용형 로봇의 상호작용 확인 및 착용형 로봇 안전사항

1. 착용자가 착용형 로봇을 조종하고 안전하게 작업을 진행할 수 있는지 확인
2. 착용형 로봇이 착용자의 동작범위를 초과하지 않는지 확인
3. 착용형 로봇이 착용자에게 유해한 힘이 생성되지 않게 맞춤설계가 되어있는지 확인

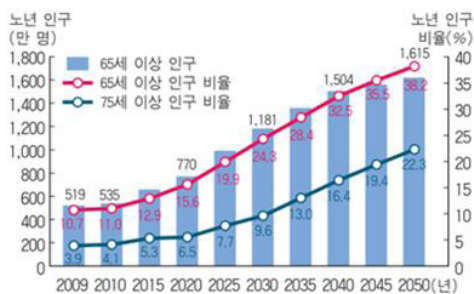
## 04 3세대: 노약자와 부분마비 장애인을 위한 착용형 로봇 기술

노약자와 하지부분마비 장애인은 하지근력이 약화되어 정상적으로 보행하기 어려우나 완전마비 장애인과 달리 스스로의 의지대로 동작이 가능하다. 따라서 완전마비 장애인과 같이 로봇이 착용자의 움직임을 제어하는 것이 아니라, 착용자의 움직임 의도를 파악하여 필요한 경우에만 보조를 해야 하기 때문에 비교적 높은 수준의 제어가 필요하다.

하지부분마비의 주요 원인인 척추 질환은 주로 노년층에서 많이 발생하기 때문에 인구의 노령화와 더불어 하지부분마비 장애인 수가 급증하는 추세이다. 특히 우리나라는 세계에서 노령화가 가장 빠르게 일어나고 있는 국가이며(그림 15), 이에 따라 하지부분마비 장애인 수도 함께 증가하는 추세를 보인다. 하지만, 하지부분마비 장애인의 수가 하지완전마비 장애인보다 매우 높은 데에 비해 해당 로봇의 개발 속도는 뒤쳐져 있다. 최근에는 부분마비 환자들의 일상보조 및 재활 로봇의 수요가 증가함에 따라 세계 여러 곳에서 이를 위한 착용형 로봇들이 개발되고 있다.



(a) 각국의 노령인구 비율 변화 추세



(b) 우리나라의 노령인구비율 변화 추세

그림 15. 노령인구비율 변화 추세

## 4.1 연구동향분석

### ▶ 해외 동향 :

완전마비 장애인을 위한 착용형 로봇은 해외에서 이미 상당수 상용화가 이루어졌지만, 부분마비 장애인을 위한 착용형 로봇은 적은 관심과 기술적 어려움으로 상용화가 거의 이루어지지 않았다. 현재 상용화 된 부분마비 장애인용 착용형 로봇으로는 일본 Cyberdyne사의 HAL과 캐나다 B-Temias사의 Keeogo가 있다(그림 16). HAL은 유럽연합에서 의료용 로봇으로 인증 받았으며 일본 후생노동성으로부터 판매승인을 받아 일본과 독일에서 400대 이상이 운용되고 있다.

최근 들어 부분마비 장애인을 위한 착용형 로봇에 대한 관심과 수요가 증가하면서 상용화를 목표로 개발하고 있는 곳이 늘어나고 있다. 부분마비 장애인과 완전마비 장애인을 위한 착용형 로봇의 경우 안전성과 성능, 평판을 고려해서 로봇의 개인판매 보다는 의료기관 등과 관계를 구축하여 장기적인 의료재활 서비스 형태로 제공하는 추세이다. ReWalk Robotics, Ekso Bionics, Hocoma, Parker Hannifin사 등이 이미 FDA승인을 받아 로봇 단위 판매가 가능하지만, 시장에 제품을 대량 공급하는 대신 여러 기관들과 제휴 관계를 맺고 긍정적인 평판을 구축하고 있다.



HAL (Cyberdyne, 일본)



Walking Assist (Honda, 일본)



Keeogo (B-Temia, 캐나다)

그림 16. 해외의 노약자 및 부분마비 환자용 착용형 로봇

### ▶ 국내 동향 :

국내에서도 2010년대 들어 대학과 연구소를 중심으로 연구가 활발해져 몇 년 사이에 급격한 성장을 보이며 미국, 일본 등 주요 로봇 선진국에 뒤처지지 않는 기술을 보유하고 있다. 국내에서 상용화를 목표로 연구개발하고 있는 부분마비 환자용 착용형 로봇으로는 헥사시스템즈의 HEXAR, 한국생산기술연구원의 ROBIN, SG로보틱스의 ANGELEGS 등이 있다(그림 17).

하지만, 완전한 상용화까지는 아직 가격 경쟁력과 서비스 형태에 대한 고민과 성능 검증 등의 준비가 더 필요하다. 신체에 부착하는 착용형 로봇의 특성상 낮은 무게 대비 고성능 고효율의 장비 부품을 요구하지만, 모터와 같은 핵심부품의 기반기술을 아직 수입에 의존한다는 문제점도 있다. 또한 세계적으로 경쟁력 있는 착용형 로봇 기술을 확보하기 위해서는 국제 표준화에 대한 관심과 참여도 필요하다.



그림 17. 국내의 노약자 및 부분마비 환자용 착용형 로봇

## 4.2 관련기술

### ▶ 역구동성이 보장된 무저항 구동기 설계기술 :

완전마비 환자와 달리 부분마비 환자들의 근신경계는 부분적으로 살아있기 때문에 착용자의 자발적인 움직임에 로봇이 예상외의 저항을 발생시키면 불편함을 느끼게 된다. 따라서 하지부분마비 환자를 위한 착용형 로봇의 관절은 착용자의 자발적인 움직임을 방해하지 않도록 하는 고유한 기계적 특성들을 가져야 한다. 또한 로봇을 구성하는 기계부품들은 인체 공학적으로 설계되어 불편함 없이 장시간 동안 사용할 수 있도록 해야 한다.

완전마비 환자를 보조하기 위하여 마스터(로봇)-슬레이브(사용자) 방법을 사용하여 로봇이 일방적인 움직임을 만들어내는 경우에는 출력과 저항력이 모두 큰 구동기가 효율적일 수 있다. 하지만 노약자와 부분마비 환자를 보조하기 위해서는 착용자가 직접 동작해서 로봇에 행동의지를 전달할 수 있어야 하므로 로봇은 반드시 착용자의 동작에 저항력을 발생시키지 않아야 한다. 이렇게 구동기 외부로부터의 동작(착용자의 동작)에 대해 구동기가 저항력을 발생시키지 않는 성능을 역구동성(Back-drivability)이라고 한다. 따라서 부분마비 환자를 위한 로봇의 관절 구동기는 역구동성이 높아야 하며, 동시에 부피가 작고 무게가 가벼워야 한다.

로봇의 관절에 높은 역구동성을 구현하기 위해 직렬탄성구동기(Series Elastic Actuator, SEA)를 사용할 수 있다. 직렬탄성구동기는 구동기를 로봇 관절에 직접 연결하지 않고 사이에 탄성체를 두어 로봇의 관절에 원하는 토크를 정밀하게 생성하는 구동 기술이다(그림 18). 직렬탄성구동기를 사용하게 되면 제어를 통해 무저항구동을 구현할 수 있을 뿐만 아니라 스프링에 의해 관절이 유연해지고 충격을 흡수할 수 있게 된다.



그림 18. 직렬탄성구동기(Series Elastic Actuator, SEA) 설계

직렬탄성구동기를 설계할 때 구동기 측의 기어비<sup>iv)</sup>를 증가시키면 착용자가 외부 힘으로부터 방해를 적게 받으며 구동기의 기계적 저항도 감소한다. 하지만 구동기의 힘을 로봇 다리에 전달하기 좋지 않으며 제어하기도 어려워진다. 부분마비 장애인의 보조를 위해서는 관절의 기계적 저항이 작은 것이 가장 중요하므로, 기계적 저항을 감소시킴과 동시에 착용자가 움직이는 범위에서 구동기 출력이 잘 전달되도록 기어비를 설정해야 한다. 그림 19와 같이 설정된 기어비에 따라 직렬탄성구동장치를 제작하고 클러치(Clutch) 메커니즘을 사용하면 착용자가 로봇을 편하게 입을 수 있고, 로봇이 과도하게 보조하는 경우 지팡이가 자동으로 풀어져 착용자의 안전도 보장할 수 있다.

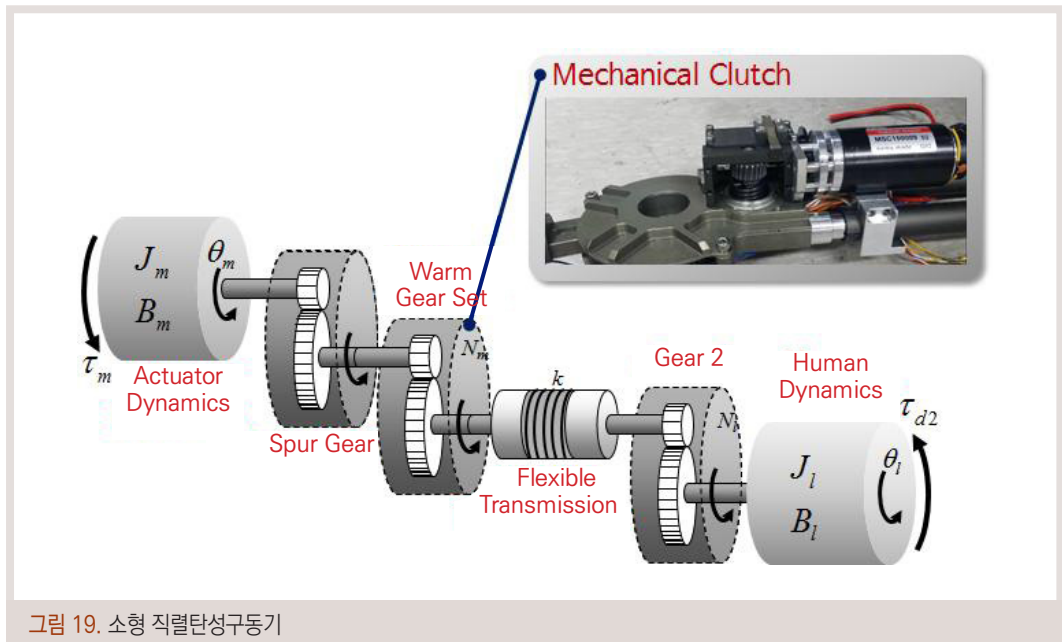
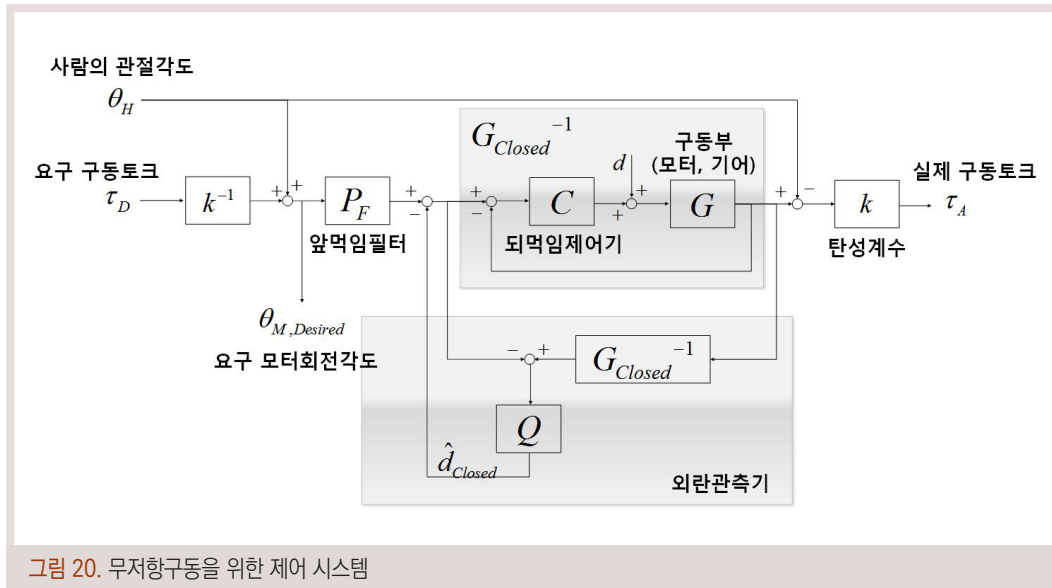


그림 19. 소형 직렬탄성구동기

<sup>iv)</sup> 서로 맞물리는 기어에 있어서, 큰 기어의 잇수를 작은 기어의 잇수로 나눈 값

**그림 20**과 같이 직렬탄성구동기를 제어하면 로봇 관절의 기계적 저항(기계적 임피던스)을 0에 가깝게 만드는 무저항구동 구현할 수 있다. 무저항구동은 착용형 로봇이 착용자의 의도를 파악하기 위한 별도의 센서 장치를 사용하지 않으면서도 착용자의 움직임을 방해하지 않기 위한 필수 요소이다.



**그림 20.** 무저항구동을 위한 제어 시스템

직렬탄성구동기를 이용하여 무저항구동을 구현하면 착용자의 움직임을 방해하지 않으면서 넓은 구동 대역폭과 정밀한 보조힘을 생성할 수 있다. 착용자의 움직임에 대해 0.6Nm 이하의 상당히 작은 저항력을 가지며(**그림 21**), 10Hz의 넓은 대역폭과 -15~20Nm 범위에서 정밀한 보조힘을 생성한 것을 볼 수 있다(**그림 22**). 이는 로봇의 다리가 1초 동안 10회의 왕복 운동을 하여도 정상 작동하며, 사람이 로봇을 착용하였을 때 다리 끝에 약 2.5kg의 물체를 매달아도 무게를 느끼지 않게 보조할 수 있는 정도의 수치이다.

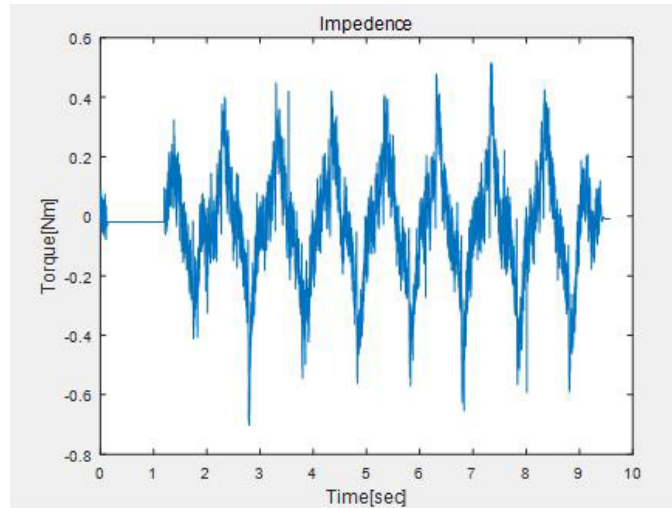
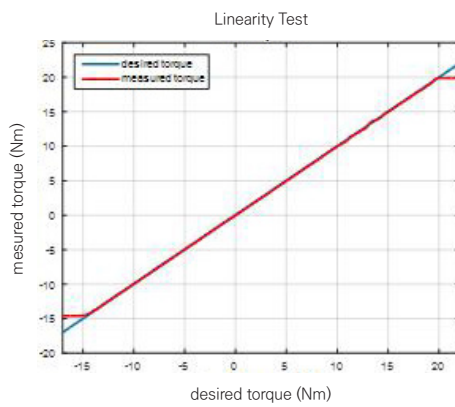
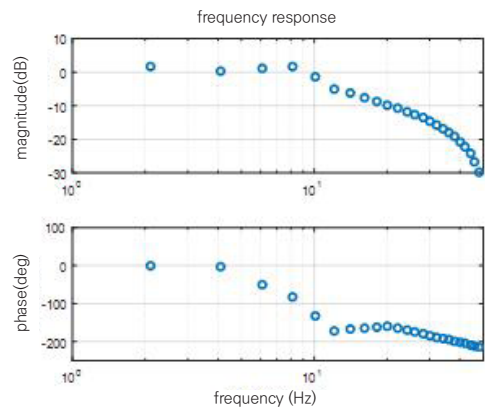


그림 21. 직렬탄성구동기 무저항구동 시 저항력



(a) 구동토크의 선형성



(b) 구동대역폭

그림 22. 직렬탄성구동기의 구동토크의 선형성과 구동대역폭

### ▶행동의도 파악기술 :

완전마비 환자를 보조하는 경우에는 버튼이나 음성인식 등의 별도의 입력장치를 두어 사용자가 원하는 동작을 로봇에 전달하는 경우가 많으나, 노약자 및 부분마비 환자의 경우에는 동작의 형태가 정해져 있지 않고 착용자가 자연스럽게 움직여 로봇에 행동의도를 전달하는 것이 보다 바람직하기 때문에 별도의 입력장치 없이 착용자의 행동의도를 파악하는 것이 중요하다.

착용자의 행동의도를 파악하는 방법으로는 보행패턴을 분석하는 방법이 있다. 족저압 측정 센서를 이용하여 신발 내 안창에서 지면반력을 측정하면 발바닥 압력분포에 따른 보행상태를 분석할 수 있다(그림 23). 사람의 보행상태는 주기에 따라 제한되기 때문에 현재 보행상태를 분석해 착용자의 다음 보행의도를 파악할 수 있다. 실시간으로 의도를 파악하여 제어를 해야 하기 때문에 측정도 실시간으로 이루어져야 한다. 또한 신발 안에서 지속적으로 족저압을 측정해야하기 때문에 내구성과 편안한 착용감이 보장되어야 한다.

퍼지 논리 알고리즘<sup>\*)</sup>을 이용하면 측정된 지면반력을 통해 보행 상태를 검출 할 수 있으며(그림 24), 보행 상태는 입각기 3단계(Heel Strike, Mid Stance, Terminal Stance)와 유각기(Swing) 1단계로 구분할 수 있다(그림 25). 뒷꿈치가 땅에서 떨어졌을 때를 Terminal Stance, 발이 공중에 있을 때를 유각기로 구분한다.

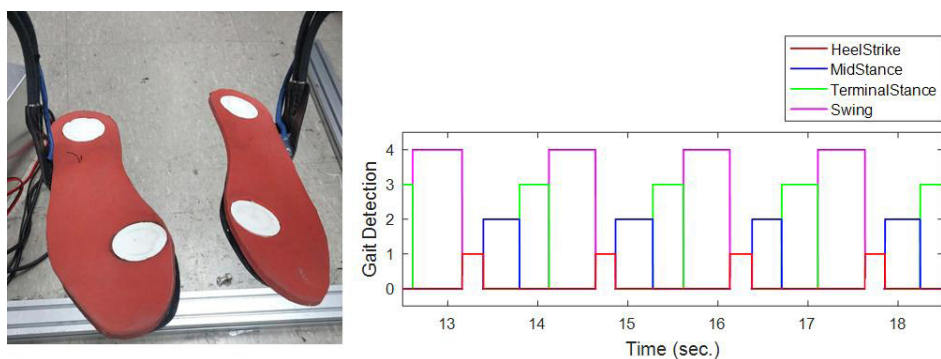
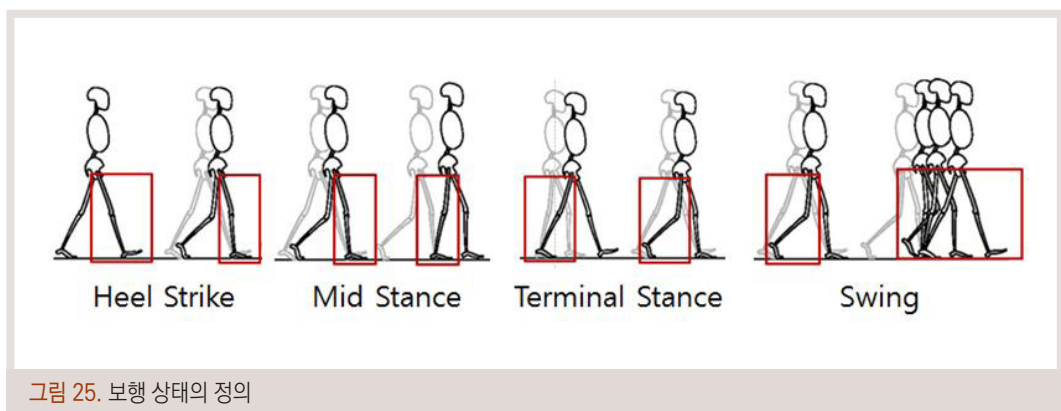
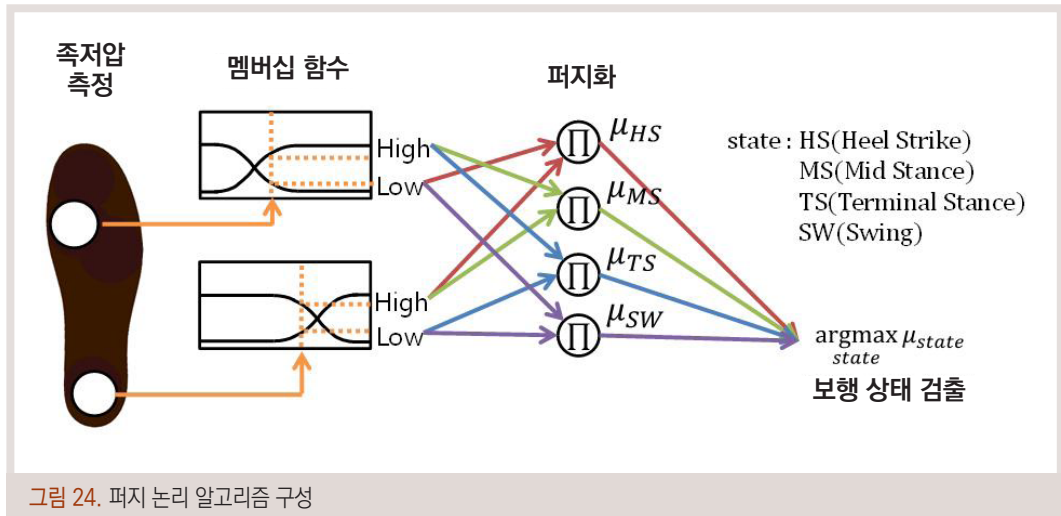


그림 23. 족저압 압력 센서 및 평지 보행 상태 검출 결과

<sup>\*)</sup> 모호한 상태를 참 혹은 거짓의 이진 논리가 아닌 여러 개의 근사값으로 구분하여 근사적으로 추론하는 방법



가속도센서, 자이로센서, 기울기센서 등의 관성센서는 착용자의 행동을 파악하는데 도움을 줄 수 있다. 관성센서는 실외환경에서 신체의 동작을 측정하고 분석하는데 필수적인 정보를 제공해준다. 로봇과 착용자에 관성센서를 부착하여 신체 동작을 측정함으로써 현재 동작을 파악할 수 있으며(그림 26), 동작 상태를 분석하여 착용자에게 적절한 제어 알고리즘을 선택할 수 있게 해준다.

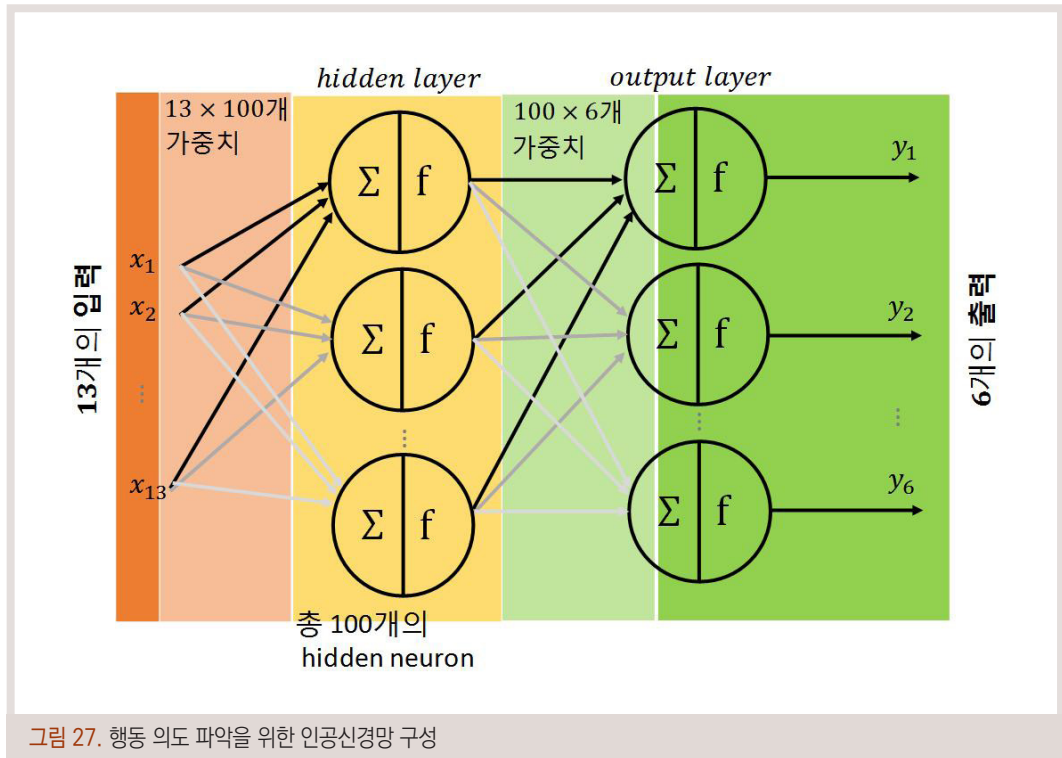


**그림 26.** 관성센서를 이용한 동작추정

착용형 로봇에 포함된 센서 신호(촉저압 측정 센서, 관성센서 등)의 패턴을 분석해 인공신경망을 구성하여 착용자의 동작 의도를 파악할 수 있다. 예를 들어 총 12개의 입력 신호로부터 인공신경망을 구성해 6개의 출력, 즉 6가지 행동 의도를 도출할 수 있다(표 2, 그림27). 인공신경망을 사용하기 위해서는 뉴런의 입력에 대한 가중치를 설정해야 하며 은닉층(hidden layer)의 100개의 뉴런, 출력층(output layer)의 6개의 뉴런에 대해 총 1900개 (13x100개 + 100x6개)의 가중치를 설정해 주어야 한다.

**▼ 표 2. 인공신경망의 입력 및 출력 신호**

입력		출력	
$x_1$	고관절각 (좌)	$y_1$	앞기→서기 의도
$x_2$	슬관절각 (좌)	$y_2$	스윙 의도 (좌)
$x_3$	고관절각 (우)	$y_3$	스윙 의도 (우)
$x_4$	슬관절각 (우)	$y_4$	슬관절 신전의도(좌)
$x_5$	몸체회전각 (roll)	$y_5$	슬관절 신전의도(우)
$x_6$	고관절각속도 (좌)	$y_6$	의도 없음
$x_7$	슬관절각속도 (좌)		
$x_8$	고관절각속도 (우)		
$x_9$	슬관절각속도 (우)		
$x_{10}$	지면반력 (좌)		
$x_{11}$	지면반력 (우)		
$x_{12}$	지면반력변화율 (좌)		
$x_{13}$	지면반력변화율 (우)		



가중치 설정은 초기에 사용자의 의도를 직접 입력받아 감독학습(supervised learning)에 의해 이루어진다(그림 28). 그림 29 (a)는 학습된 인공신경망을 이용해 분류된 사용자의 의도를 나타내며, 그래프의 값이 1에 가까울수록 해당 동작의 의도가 있다고 판단한다. 그림 29 (b)는 착용형 로봇을 입고 동작을 하면 컴퓨터 화면 상에 동작 의도가 표시되는 영상의 일부를 나타내며 목표한 동작에 대해 성공적으로 행동 의도를 검출한 것을 볼 수 있다.

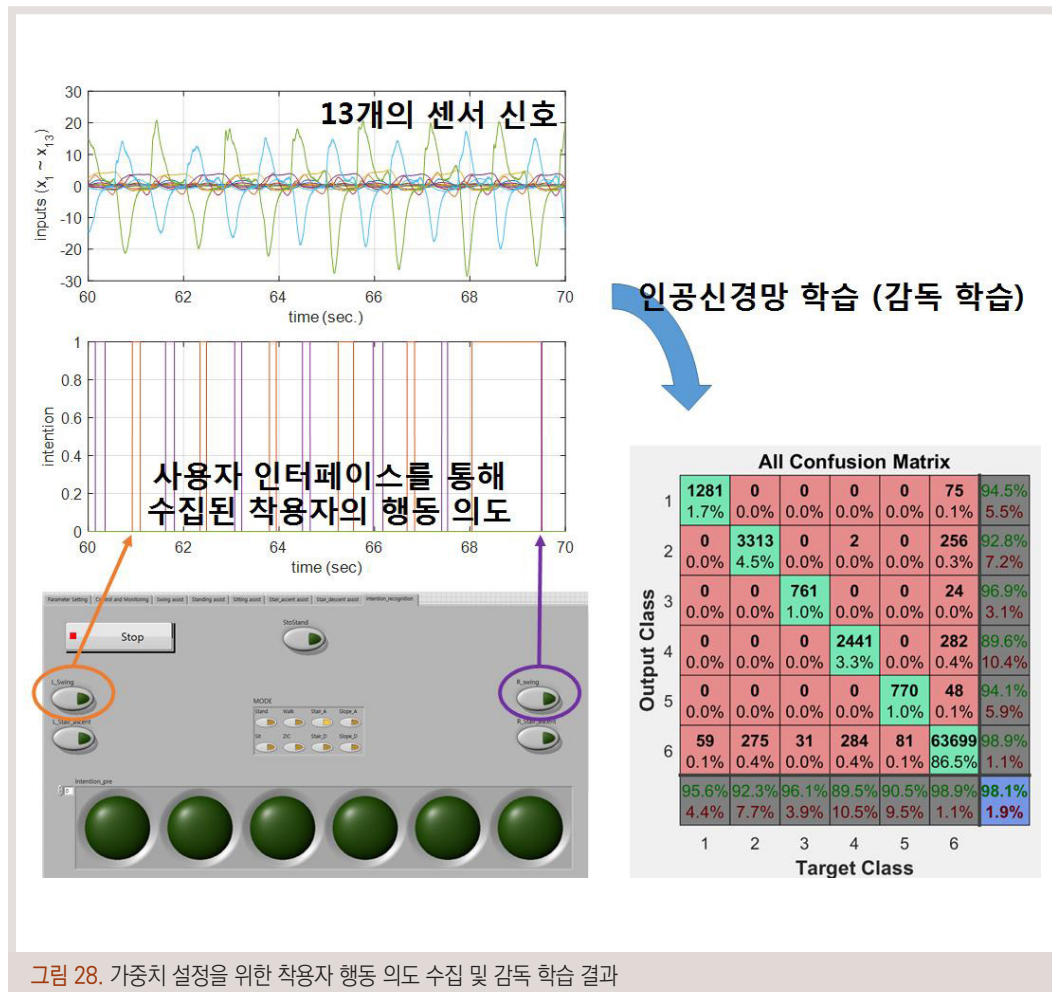
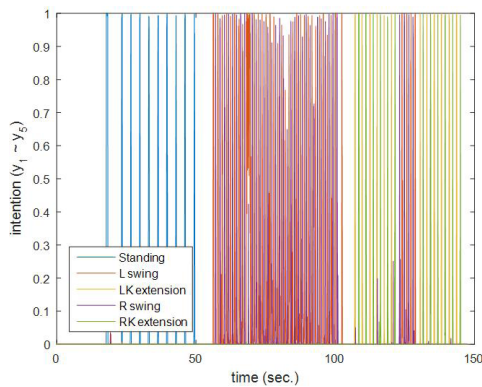


그림 28. 가중치 설정을 위한 착용자 행동 의도 수집 및 감독 학습 결과



(a) 학습된 인공신경망에 의해 분류 및  
검출된 착용자의 행동 의도



(b) 착용자의 행동 의도 검출 화면

그림 29. 학습된 인공신경망을 이용한 착용자의 행동 의도 검출

### ▶안전성 보장기술 :

정상인의 경우에는 비정상적인 행동이 발생하거나 무게중심이 원치 않게 이동하였을 경우에도 균형을 잡아 안정을 되찾을 수 있지만, 노인과 환자를 대상으로 하는 보조로봇의 경우에는 로봇이 반드시 안전성을 보장해야한다. 부분마비 환자는 정상인만큼 근육제어능력이 좋지 않기 때문에 외부 환경에 취약하다. 이와 관련해서 착용자의 동적 안전성을 측정 및 평가하는 기술이 필요하고, 안전성에 문제가 발생하였을 경우 대처하는 방법이 요구된다.

부분마비 장애인은 근력약화 정도, 장애 발생 기간 등에 따라서 관절의 건강 상태가 모두 다르기 때문에 개개인에 맞추어 관절의 운동범위를 설정해주어야 한다. 이때 로봇의 관절이 발생시키는 힘을 이용하여 개개인에 따라 관절운동범위를 설정하는 알고리즘을 구현할 수 있다. 로봇 관절이 운동범위를 제한하기 위해 발생시키는 힘은 스프링과 댐퍼(제진기)로 모델링 되어서 사용자에게 부드럽게 전달된다.

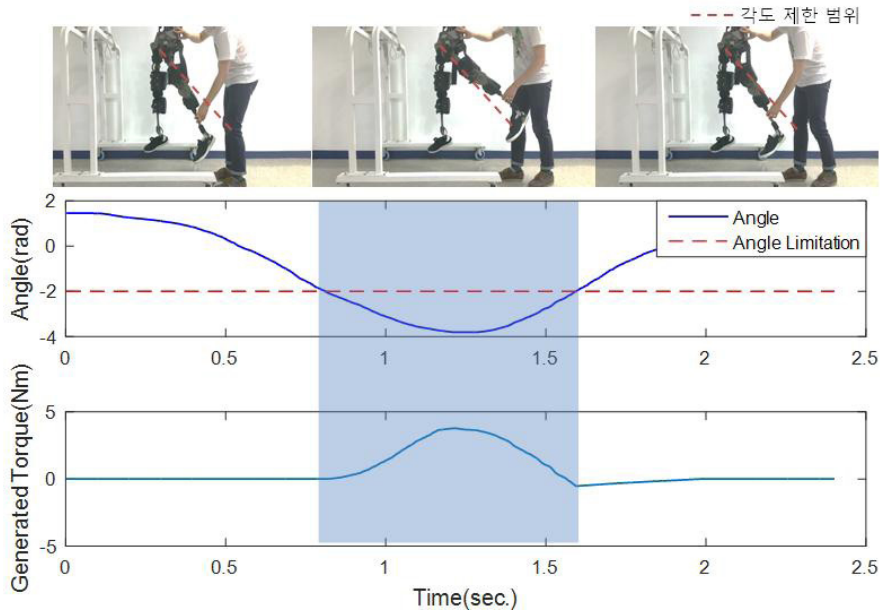


그림 30. 운동범위 제한 알고리즘을 통한 모터 보조력 생성 확인

로봇 자체의 기계/전기적 안전성 또한 매우 중요하다. 착용형 로봇이 이동하면서 계속 변화하는 주위의 전자기적 환경에 영향을 받지 않고 정상 작동해야 하며, 전자기기로서 로봇이 방사하는 전자파의 양도 제한되어 있다. 그리고 비의료기기(의지보조기)로서 착용형 로봇을 판매하기 위해서는 로봇 자체에 대해 방송통신기자재 적합성평가 제도에 의해 전자파 적합등록 인증을 받아야 한다. 전자파 적합등록을 위해서는 지정된 시험평가기관에서 실시하는 전자파 장애, 내성, 성능 시험을 진행하고 시험 성적서를 제출해야 한다(그림 31).



그림 31. 전자파 적합 시험

### ▶로봇 제어 알고리즘 :

로봇 관절의 기계적 저항은 직렬탄성구동기의 무저항구동으로 보상할 수 있지만, 착용자의 다리와 로봇의 링크 자체의 회전관성 등의 기계적인 특성은 이와 별개로 보상해주어야 한다. 근력이 약화된 부분 마비 장애인의 움직임을 보조하기 위해서 인체 내 근육 제어 메커니즘을 모방하여 가상이득 제어 방법을 구현할 수 있다(그림 32). 이 제어 방법은 환자의 근력이 약해져서 환자가 비정상적으로 움직인다고 가정하고, 근력이 가상의 이득값  $K$ 만큼 증폭되는 효과를 내도록 로봇이 보조력을 생성하는 개념이다. 로봇에 이득값  $K$ 가 조절 가능한 다이얼을 설치하면, 사용자가 직접 다이얼을 설정하여 원하는 만큼의 보조력이 생성되도록 조절할 수 있다.

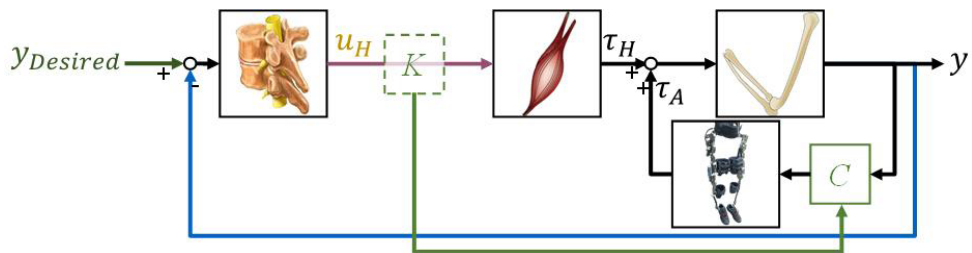


그림 32. 가상이득을 통한 회전관성 보상

## 05 맺음말

1950년대 말 General Electric社에서 처음으로 웨어러블 로봇의 개념과 시제품을 개발한 후 지난 반세기 동안 웨어러블 로봇은 수많은 과학기술자들에 의해 눈부신 발전을 거듭해왔다. 로봇자체의 무게를 줄이거나 제어알고리즘의 안정성을 검증하기 어려웠던 2000년대 초반까지는 주로 비장애인의 뛰어난 운동신경과 균형감각에 의지한 채, 사람 대신 로봇에 하중을 가하는 형태의 근력증강용 웨어러블 로봇이 주를 이루었다. 하지만 웨어러블 로봇이 신체가 건강한 비장애인 사용자의 운동속도와 자유도를 따라가지 못하는 경우가 대부분이었고, 따라서 많은 연구가 상용화로 이르지 못하고 연구단계에서 머무르고 말았다.

완전마비 장애인의 경우에는 근육이 완전히 마비되어 자발적인 운동을 만들어내지 못하고 감각기관도 마비되어 느끼지도 못하므로, 웨어러블 로봇의 부족한 운동속도와 자유도가 큰 걸림돌이 되지는 않았다. 게다가 오랜 기간 불편한 생활을 해야 했던 장애인들을 일으켜 다시 걷게 한다는 점에서 많은 대중들의 관심과 격렬한 환호를 받기에 적합한 아이템이었다. 이에 전 세계 주요 국가들이 경쟁적으로 완전마비 장애인을 위한 웨어러블 로봇 개발에 뛰어들었으며, 미국을 중심으로 몇 개의 로봇들이 상품화에 성공하기도 하였다. 나아가 지난 10월 스위스에서 열린 사이배슬론 대회는 전 세계의 내로라하는 웨어러블 로봇들의 경쟁을 한 눈에 살펴볼 수 있는 자리였다.

2010년대 초반 이후, 모터 등의 구동기와 제어기 기술이 일정 수준에 도달함에 따라 신체가 약화된 노약자를 비롯한 불완전마비 환자를 위한 웨어러블 로봇에까지 도전장을 내밀고 있다. 노약자를 위한 로봇은 로봇의 무게가 극히 가벼워야 하고, 정밀한 보조력 생성과 함께 로봇이 사용자에게 가하는 저항력이 0에 가까워야 한다. 또한 사용자의 무한한 의도를 완전히 파악해야 하며, 방진, 방수 등의 안전대책까지 고려해야 하는 등 다른 적용분야에 비해서 매우 까다로운 조건들을 모두 만족해야 한다. 따라서 웨어러블 로봇 기술의 최고정점이라 해도 과언이 아니다.

우리나라는 웨어러블 로봇 분야에서 충분한 경쟁력을 가지고 있다. 사이배슬론 대회에서 세계랭킹 3위를 기록한 본 연구진을 비롯하여, 여러 대기업과 중소기업들이 웨어러블 로봇 개발에 박차를 가하고 있다. 비록 모터와 모터드라이버, 제어기와 같은 필수 기초부품들을 외국산에 의존해야 하는 문제점이 있지만, 웨어러블 로봇을 위한 기초부품에 선별적으로 집중투자하고 정부차원에서 해당 부품산업을

육성한다면 충분히 세계최고의 웨어러블 로봇 기술을 가질 수 있을 것이다. 그러나 우리에게 주어진 시간이 많지는 않다. 미국에서는 여러 웨어러블 로봇 기업들이 앞 다투어 인증과 규제를 만들어가며 진입 장벽을 높이고 있고, 일본에서는 정부에서 웨어러블 로봇 940만대를 순차적으로 노인과 장애인들에게 보급한다는 정책을 발표하였다. 우리나라도 더 늦기 전에 카드를 내 놓아야 한다. 많은 연구원들이 국내에서만 서로 경쟁하지 않고, 서로의 장점을 융합하여 최고의 기술을 만들어 세계와 경쟁해야 할 것이다.

저자 **공 경 철**

Kyoung Chul Kong

**학 력** UC Berkeley 기계공학 박사  
서강대학교 기계공학 석사  
서강대학교 기계공학/물리학 학사

**경 력** 現) 서강대학교 기계공학과 교수  
前) University of Paris, Est Creteil 방문교수  
前) UC Berkeley 박사후연구원