양성자가속기 개발 및 운영현황

DOI: 10.3938/PhiT.25.001

권혁중·김한성

Development and Operational Status of the Proton Linear Accelerator at the KOMAC

Hyeok-Jung KWON and Han-Sung KIM

A 100-MeV proton linear accelerator at the KOMAC (Korea Multi-purpose Accelerator Complex) was under development for past 15 years, including preliminary design study period, and was successfully commissioned in 2013. The linac is composed of a 50-keV microwave proton source, a 3-MeV four-vane-type RFQ (radio-frequency quadrupole) and a 100-MeV DTL (drift tube linac). Subsystems for the accelerator operation, such as the RF power delivery system, the high-voltage DC power supply, the vacuum system, the cooling system, and the measurement and control system have also been prepared. The operation of the linac for user service started in July 2013 with two beam lines: one for a 20-MeV beam and the other for a 100-MeV beam. In 2015, the operating time was more than 2,800 hours with an availability of better than 89%, and more than 2,100 samples were treated. Currently, a new beamline for radio-isotope production is being commissioned and a continuous effort has been made to increase the average beam power.

Table 1. Specification of 100-MeV proton linac.

Parameters	Specification	
Output energy	20 MeV	100 MeV
Maximum peak current	20 mA	20 mA
Maximum beam duty factor	24 %	8 %
Average beam current	4.8 mA	1.6 mA
Beam pulse length	2.0 ms	1.33 ms
Maximum repetition rate	120 Hz	60 Hz
Average beam power	96 kW max.	160 kW max.
RF frequency	350 MHz	350 MHz
Number of beam lines	5 EA	5 EA

Fig. 1. Schematic layout of 100-MeV proton linac at KOMAC.

서론

한국원자력연구원 양성자가속기연구센터에서 개발하여 운영 중인 100 MeV 양성자가속기의 제원은 표 1과 같다. 양성자가속기는 2002년부터 개발을 시작하여 2012년에 설치를 완료하였으며, 2013년 상반기에 시운전을 거쳐 2013년 7월부터 양성자빔을 사용자에게 공급하기 시작하였다. 100 MeV 양성자가속기는 이온원, RFQ(Radio Frequency Quadrupole), DTL(Drift Tube Linac), 빔라인으로 구성되어 있으며, 이외에 고주파 계통, 제어계통 등이 있다. 양성자가속기 구성도는 그림 1에 나타나 있다.

저자약력

권혁중 박사는 서울대학교 원자핵공학과 박사(2001년 8월)로서 2002년부터 한국원자력연구원 책임연구원으로 재직하면서 과학기술연합대학원대학, 가속기 및 핵융합물리공학전공 교수(2004년~)를 겸임하고 있으며 2016년부터 한국원자력연구원 양성자가속기연구센터 가속기연구실장을 맡고 있다.(hjkwon@kaeri.re.kr)

김한성 박사는 서울대학교 원자핵공학과 박사(2006년 2월)로서 현재 한국원자력연구원 선임연구원(2006년)으로 재직 중이며 과학기술연합대학원대학, 가속기 및 핵융합물리공학전공 교수(2007년~)를 겸임하고 있다.(kimhs@kaeri.re.kr)

Table 2. Specification of microwave ion source.

Parameters	Specification
Extraction energy	50 keV
Maximum peak current	30 mA
Microwave frequency	2.45 GHz
Microwave power	1 kW max.
Operation mode	Pulse
Nominal operation pressure	1.5E-5 torr

Fig. 2. Microwave ion source installed at accelerator tunnel.

양성자가속기 개발

1. 이온원

이온원은 수소기체를 이용해서 플라즈마를 발생시키고 이로부터 양성자를 인출하는 곳으로 100 MeV 양성자가속기의 가장 처음 부분에 해당하며, 마이크로파 전력을 이용하여 수소를 방전시킨다. 마이크로파 이온원은 기존에 필라멘트를 이용한 이온원에 비해서 유지보수 없이 대전류 양성자 빔을 인출할 수 있는 운전시간이 길다는 장점이 있다. 양성자가속기연구센터에서 개발한 마이크로파 이온원은 한 개의 솔레노이드 전자석을 사용하여 크기를 줄였으며, 절연도파관을 이용하여 마이크로파 부품의 운전을 단순화하였다는 장점이 있다. 또한 플라즈마를 항상 운전하고 있는 상태에서 인출전원만을 스위칭하여 빔을 인출하는 구조이므로, 양성자 빔 펄스폭을 자유롭게 바꿀 수 있는 특징이 있다. 마이크로파 이온원의 제원은 표 2에 나타나 있으며, 그 모습은 그림 2와 같다.

2. RFQ

RFQ는 이온원에서 인출한 50 keV 양성자 빔을 3 MeV까지

Table 3. Specification of Radio-Frequency Quadrupole.

Parameters	Specification
Resonant frequency	350 MHz
Input beam energy	50 keV
Output beam energy	3.0 MeV
Peak beam current	20 mA
Structure	4-vane type
RF input coupling	Iris coupling
Total length	3.2 m
Duty factor	24 % max.

Fig. 3. Development process of 3-MeV RFQ.

가속시키는데 사용되며, 그 제원은 표 3에 나타나 있다. RFQ는 4개의 전극(베인)으로 이루어진 공동(cavity) 구조이며, 전극 끝이 sine 형태로 가공되어 있고, 이 구조의 주기 및 크기는 양성자 빔의 속도에 따라 변화한다. 이런 구조를 이용하여 RFQ는 양성자 빔을 가속할 뿐만 아니라 집속, 변칭시키는 역할을 동시에 수행하는 특징을 가지고 있다. 양성자가속기연구센터에서 개발한 RFQ는 네 개의 섹션으로 구성되어 있으며, 빔 동력학, 전자기 계산을 통해 얻어진 설계를 바탕으로 전극을 가공하고, 4개의 전극을 진공 브레이징 방법을 통하여 접합한 후 진공시험과 설계한 전자기적 특성을 갖도록 튜닝의 과정을 거쳐 완성되었다(그림 3). RFQ 개발 시 전극을 20 μm 이내로 정밀하게 가공하는 기술과 80 cm 길이의 전극 4조각을 한꺼번에 브레이징하여 접합하는 기술을 국내에서 개발할 수 있었다. 이와 같은 대용량 RFQ는 미국, 일본에 이어 세계에서 세 번째로 국내기술로 개발하였다.

3. DTL

DTL은 RFQ에서 가속된 3 MeV의 양성자 빔을 100 MeV까지 가속하는데 사용되며, 총 11개의 탱크가 사용된다. 그 제원은 표 4에 나타나 있다. DTL은 그림 4에 나타나 있듯이 시계 추와 같이 생긴 Drift Tube를 연속적으로 배치하여 양성자를 가속하게 되며, Drift Tube 사이의 거리가 그 위치에서 양성자

Table 4. Specification of Drift Tube Linac.

Parameters	Specification
Resonant frequency	350 MHz
Input beam energy	3.0 MeV
Output beam energy	100 MeV
Peak beam current	20 mA
Focusing lattice	FFDD
Focusing magnet	Electromagnetic quadrupole
Number of tank	11 EA
Total length	71.4 m including MEBT

Fig. 4. Inside view of the DTL.

속도로 고주파 한 주기 동안 진행하는 거리가 된다. DTL에서 설치된 Drift Tube는 총 300개다. DTL은 빔 동력학, 전자기 계산을 통해 얻어진 설계를 바탕으로 해서 길이가 2.0 m인 실린더 형태의 탱크 한 섹션을 제작하고, 전기적 특성을 향상시키기 위해서 철로 가공된 탱크 내부를 구리로 도금한 후, 세 개의 섹션을 조립하여 한 개의 탱크를 완성한다. 이와는 별도로 빔 집속을 위해 Drift Tube 내부에 사극 전자석을 설치한 후 Drift Tube를 제작하고 이를 탱크에 설치한 후 설계된 전자기적 특성을 갖도록 튜닝의 과정을 통하여 완성한다(그림 5). DTL 개발 시에는 길이 2.0 m, 직경 50 cm의 실린더 내부를 균일하게 구리로 도금하는 기술과 Drift Tube 내부의 제한된 공간에 설치할 수 있는 소형 사극전자석을 제작하는 기술을 국내에서 개발할 수 있었다. 양성자가속기연구센터에 설치된 100 MeV 가속기의 모습은 그림 6과 같다.

4. 빔라인

빔라인은 가속된 양성자빔을 사용자에게 공급하기 위해 표적 실까지 수송하기 위한 장치이다. 100 MeV 양성자가속기를 이

Fig. 5. Development process of the DTL.

Fig. 6. Drift tube linac installed in the accelerator tunnel.

용하는 빔라인은 모두 10개가 설계되어 있으며, 2013년 시운전을 시작할 때에는 20 MeV 빔라인 1기, 100 MeV 빔라인 1기 등 총 2기의 빔라인이 설치되어 2015년 현재까지 운영되고 있다. 빔라인에는 빔의 방향을 바꾸기 위한 이극전자석과 빔 집속을 위한 사극전자석 그리고 빔의 정보를 얻기 위한 빔 진단장치가 설치되어 있다. 운영 중인 2기의 빔라인은 모두 시료를 외부에 설치하고 양성자빔을 진공 중에서 대기 중으로 인출하여 조사하는 표적실을 사용하고 있다. 양성자 빔은 통과시키며, 진공벽 역할을 하는 부품을 빔창이라고 부르며, 양성자가속기에서는 열적, 기계적 특성을 고려하여 알루미늄, 베릴륨 합금을 사용하고 있다. 또한 빔창 손상시 가속기를 보호하기 위하여 고속밸브가 설치되어 있다.

5. 고주파 계통

양성자가속기에서는 고주파 증폭기로 클라이스트론을 사용하고 있으며 그 제원은 표 5에 정리되어 있다. 100 MeV 양성자가속기에는 총 9기의 클라이스트론이 사용되고 있으며, 특히 20 MeV DTL의 경우 한 개의 클라이스트론을 이용해서 4기의 독립된 DTL 탱크를 운전한다는 것이 큰 특징이다. 클라이스트론이 설치된 클라이스트론 갤러리의 모습이 그림 7에 나타나 있다. 클라이스트론을 운전하기 위해서 펄스 전원인 모듈레이

Table 5. Specification of klystron RF amplifier.

Parameters	Specification
Model	TH2089K (THALES)
Operating frequency	350 MHz
Beam voltage	107 kV max.
Beam current	26 A
Modulating anode voltage	71 kV max.
Peak RF power	1.6 MW
Gain	41 dB min.
Efficiency	58 % min.

Fig. 7. Klystron gallery.

터를 사용하고 있으며 그 제원은 표 6과 같다. 양성자가속기에 사용되는 모듈레이터는 반도체 스위치를 사용하여 20 kHz로 고속 스위칭을 하기 때문에 기존 전원에 비해서 부피를 줄일 수 있었다는 것이 큰 특징이다. 100 MeV 양성자가속기에는 총 4기의 모듈레이터가 사용되며 1개의 모듈레이터로 클라이스트론을 2기 혹은 3기를 동시에 운전한다. 운전 중인 모듈레이터의 모습은 그림 8과 같다. 고주파 계통은 양성자가속기 운전 전에 핵심적인 부분으로 DTL 탱크 내부에서의 고주파 크기 및 위상은 각각 1%, 1도 이내로 제어되어야 한다. 양성자가속기연구센터에서는 고주파 제어를 위하여 디지털 제어시스템을 기반으로 한 저출력 고주파 시스템을 2006년에 국내 최초로 개발하여 현재 가속기 운전에 사용하고 있다.

6. 제어계통

양성자가속기 제어시스템은 감시와 조작은 집중하고 위험성은 분산시키기 위한 목적으로 분산제어 방식이 적용되었다. 전체 제어시스템은 Experimental Physics Industrial Control System (EPICS) 소프트웨어를 적용하여 구축되었다. EPICS 제어시스템은 네트워크를 기반으로 상호접속이 이루어지며, In-

Table 6. Specification of high-voltage pulse modulator.

Parameters	Specification
Peak output power	5.8 MW
Pulse repetition rate	60 Hz max.
Pulse width	1.5 ms max.
Maximum Duty factor	9 %
AC input to SCR unit	3.3 kVac 3-phase
SCR unit output voltage	2.2 kV max.
DC output voltage	105 kV max.
DC output current	50 A max.

Fig. 8. Pulsed modulator installed at modulator room.

put Output Controller (IOC)와 Operator Interface (OPI)로 구성된다. 현재 IOC 70대와 OPI 20대가 운영되고 있으며, 사용되는 Process Variable (PV)는 10,000개에 달한다.

7. 초전도 가속기

양성자가속기연구센터에서는 현재 설치되어 있는 100 MeV 가속기를 1 GeV로 확장하고자 하는 계획을 가지고 있다. 이때 100 MeV 이상의 에너지에서는 DTL과 같은 초전도 가속기보다는 초전도 가속기를 사용하는 것이 효율적이다. 따라서 양성자가속기연구센터에서는 이를 대비하여 초전도 가속기 기술을 개발하였다. 기본 설계는 5셀을 가지는 타원형태의 초전도 가속관으로 하였으며, 빔광학 및 전자기 계산을 통하여 상세설계를 하였으며, 순수 니오븀을 이용하여 타원 형태로 만들고 이를 전자빔 용접을 통하여 접합하였다. 설계값의 전자기 특성을 갖도록 하기 위하여 튜닝을 하였고, 원하는 전장강도를 갖기 위하여 가속관 내부를 화학세척한 후, 4 K에서 고주파 시험을 수행함으로써 설계부터 시험까지의 일괄적인 초전도 가속기 제작 기술을 보유할 수 있었다.(그림 9)

Fig. 9. Development process of Superconducting RF cavity.

Fig. 10. Accelerator operation time (upper) and availability (lower).

운영현황

1. 가속기 운영현황

2013년 상반기 빔 시운전을 준비하여 6월 1 kW의 빔을 100 MeV 표적실로 전달하였으며, 한국원자력안전위원회의 인허가를 획득한 후 2013년 7월 22일 사용자에게 처음으로 빔을 제공하였다. 2014년에는 가속기 출력을 10 kW로 증강시켜 인허가를 변경하였으며 현재에 이르고 있다. 가속기는 주간을 기본으로 하여 월요일 빔을 켜고 금요일 빔을 끄는 시나리오로 운전하고 있다. 연간 운전은 2015년의 경우 빔 서비스 25주, 가속기 특성시험 9주 그리고 유지보수 및 성능향상에 19

Fig. 11. Downtime distribution according to the components.

Table 7. Specification of RI production beamline.

Parameters	Specification
Beam energy	100 MeV
Peak beam current	20 mA
Beam duty	3% (500 μ s, 60 Hz)
Energy per pulse	1000 J/pulse
Target diameter	100 mm
Beam size (FWHM)	14.2 mm by 12.4 mm
Scanning method	Wobbling
Beam window material	AlBeMet

주가 할당되어 있다. 2015년 12월 기준으로 하여 연 운전시간 2,749시간, 2013년 이후 누적 운전시간은 7,902시간을 달성하였으며 가속기 가동률은 2015년 기준 89.9%, 누적 가동률은 86.5%에 달한다(그림 10). 2015년도 장치별 불시정지시간 비율은 그림 11과 같다. 이온원 트립에 의한 불시정지가 32%, 모듈레이터 트립에 의한 불시정지가 31%로 두 장치에 의한 불시정지가 63%에 달함을 알 수 있다. 위의 두 장치 모두 가속기의 핵심장치이므로 별도로 테스트 스탠드를 구축하여 성능향상을 도모하고자 한다.

2. RI 생산용 빔라인 증설

2015년까지는 두 개의 빔라인을 운영하고 있으며, 따라서 보다 많은 이용자에게 빔을 제공하는 데에는 한계가 있었다. 따라서 보다 다양한 이용자에게 빔을 제공하고 양성자가속기를 보다 효율적으로 활용하기 위해서 2015년도에는 동위원소 생산용 빔라인 1기를 추가로 구축하였으며 그 제원은 표 7과 같다. 동위원소 생산용 빔라인의 빔 수송계는 그림 12에 나타나 있듯이 기존의 직선 빔라인에서 이극전자석을 이용하여 90도 빔 방향을 바꾸어 동위원소 생산용 표적실로 빔을 전송하며 빔 수송계 종단에는 직경 100 mm 빔창이 설치되어 있다. 표적실 내부에는 동위원소 생산용 표적이송장치가 설치되며 표적

Fig. 12. Layout of beam delivery system for the RI production beamline.

은 냉각장치에 의해 냉각된다. 동위원소 생산용 표적 및 냉각 장치는 그 운전 안정성이 매우 중요하므로 시험품을 제작하여 오프라인에서 시험을 하였으며 현재까지 표적이송장치 18,000 회 왕복 시험, 표적냉각장치는 300시간 시운전을 완료하였다. 빔라인의 빔 수송계는 그림 13과 같이 설치를 완료하였으며 2015년 12월 말 핫셀, 표적이송장치, 표적냉각장치, 차폐시설 등의 설치를 완료하고 2016년 상반기 시운전 및 시설검사를 한 후 시험운전을 할 예정이다.

가속기 기반기술연구

양성자가속기연구센터에서는 100 MeV 양성자가속기를 개발 하면서 얻어진 기술을 이용하여 가속장치관련 연구를 수행하고 있다. 가속기의 핵심장치라고 할 수 있는 이온원의 성능향상을 위하여 마이크로파 이온원 테스트 스탠드를 구축하여 운영하고 있으며, 이외에 이온가속기에 이용 가능한 고주파 이온원 개발, 다가 이온빔 인출을 위한 전자빔 이온원 개발 연구를 수행 하고 있다. 100 MeV 양성자가속기의 불시정지 원인 가운데 가장 큰 비율을 차지하고 있는 모듈레이터 및 고출력 고주파 시스템의 성능향상을 위하여 고출력 고주파 테스트 스탠드를 구축 중에 있다. 모듈레이터 충전용 직류전원은 개발을 완료하였으며, 모듈레이터 탱크는 개발 중에 있다. 2016년 고출력 고주파 테스트 스탠드의 구축이 완료되면 모듈레이터의 성능향 상뿐만 아니라 독립적으로 클라이스트론을 시험할 수 있는 시

Fig. 13. Installed beamline for RI production.

설을 보유하게 되어 고출력 고주파 시스템의 전반적인 성능향 상을 가져올 수 있을 것이라고 기대한다. 또한 100 MeV 양성 자 빔 이외에 다양한 종류의 이온빔을 이용자에게 제공하고자 RFQ를 기반으로 하는 1 MeV/n 에너지를 갖는 이온가속기를 개발 중에 있다. RFQ는 기존 100 MeV 가속기 개발에 사용되 었던 독자적인 기술을 사용하여 개발하고 있으며, 100 MeV 가속기 개발 기술의 활용에 있어 새로운 영역을 개척할 수 있 으리라고 기대한다.

맺음말

양성자가속기연구센터의 100 MeV 양성자가속기는 2002년 부터 개발을 시작하였으며, 개발과정을 통해 RFQ, DTL 그리 고 초전도 가속기의 설계, 제작, 설치, 시험까지의 일련된 기술 을 보유할 수 있었으며, 이온원, 고주파, 제어 등 양성자가속기 관련 핵심기술을 개발할 수 있었다. 2013년부터 이용자에게 빔 서비스를 시작하였고 해를 거듭할수록 가속기 운영시간 및 가동률이 증가하고 있으며 이를 통해서 점차 안정적인 운영단 계로 진입하고 있음을 알 수 있다. 양성자가속기연구센터에서 는 양성자가속기의 성능향상을 위하여 핵심장치의 테스트 스탠 드를 구축하여 운영하고 있으며 이와는 별도로 그간 축적된 가속기관련 기반기술을 이용하여 보다 많은 이용자들에게 다양 한 빔을 제공할 수 있는 장치도 개발 중에 있다. 이러한 노력 들이 양성자가속기연구센터에서 빔 서비스를 이용하는 이용자 들에게 최적의 연구 환경을 제공할 수 있기를 기대한다.