



양성자 가속기와 산업

최병호·하장호

한국원자력연구소 핵물리공학팀

1. 서론

입자가속기란 전기를 띤 입자인 전자나 양성자를 전기장을 사용하여 아주 빠른 속도, 즉 큰 운동 에너지를 갖도록 만들어주는 장치이다. 가속기 기술은 미국, 소련, 유럽, 일본 등 과학기술 선진국들이 과거 1930년대부터 지금까지도 자국의 기술력 내지는 국방력 확보의 한 수단으로서 막대한 재원을 투입하여 가속 장치 개발 및 이용연구에 집중적인 노력을 기울여왔다. 그 예로서 가속기는 2차 대전중 핵무기 개발에 필요한 핵자료 생산용으로 사용되었고, 그 이후 원자력의 평화적 이용과 관련하여 상용로 개발에서 요구되는 핵자료 생산, 핵연료, 원자력재료 개발과 방사선 차폐 및 계측기 개발, 중성자 이

용 연구 및 동위원소 생산 등에 사용되어 원자력의 기반시설로서 원자력과 불가분의 관계로 발전 되어왔다. 또 한편으로 가속기는 물리학의 물질의 궁극적인 원소를 탐구하고 우주의 기원을 규명하는 실험 수단으로서도 기초 과학 발달에 지대한 공헌을 하였다. 1980년대 들어와 한꺼번에 다량의 입자를 가속할 수 있는 대전류 가속장치 기술이 개발되어, 이제까지 소전류 가속기를 이용한 원리 규명 등 기초 연구에서 벗어나, 대전류 가속기를 산업적으로 직접 응용할 수 있는 길이 트이게 되었다. 이를 토대로 21세기에 들어와 대용량 양성자가속기를 사용한 양성자공학(Proton Engineering) 및 중성자과학(Neutron Science)이라는 새로운 연구분야가 태동되고 있으며, 이를 이용한 새로운 산업적 응용 연구가 활발히 수행되고

있다. 본고에는 이러한 대용량 양성자가속기의 산업적 이용 가능성과 기술 개발현황을 간략히 살펴보고자 한다.

II. 가속기 개발의 역사 및 현황

2.1 가속기 발전의 역사

가속기 개발은 1900년대 초에 태동된 양자론과 상대론에 기초한 원자 및 핵물리 연구를 위한 물질의 탐침(Probe) 수단으로 1930년대부터 개발되기 시작하여, Cockcroft-Walton, Van de Graaff, Cyclotron, 선형가속기(Linear Accelerator) 등이 개발 되어 핵물리 연구, X-선 발생, 방사성동위원소 생산 등 연구용 의료용으로 사용되어 왔다. 이러한 가속기는 2차 대전중 핵무기 개발에 필요한 핵자료 생산용으로 사용되었으며, 전후에는 더 높은 에너지로 효율 좋게 입자를 가속할 수 있는 강집속 기술(Strong Focusing)과 Synchrotron 가속기 기술이 개발되었다. 이는 바로 소립자 및 고 에너지 물리연구에 투입되었으며 속속 대형장치들이 건조되어 60년대 초에는 그 입자 에너지가 GeV급에 80년도는 TeV급에 도달한 바 있다. 이들 가속기는 기초학문 연구에 많은 공헌을 할 수 있었으며, 그 결과 많은 노벨상 수상자도 배출되었다.

그러나 가속기 기술 중에 빔 에너지 축에 이은 또 하나의 다른 축은 빔 전류이다. 빔 에너지는 비교적 쉽게 높일 수 있지만, 빔 전류는 전기를 띤 가속입자들 사이에 강한 반산력으로 다량의 입자를 동시에 가속하기는 매우 어렵다. 이 기술은 1980년대 들어와 미국에서 비로소 실현되어 현재 약 100mA급 대전류 양성자

가속기 기술이 확립된 상태이다.

2.2 국외 개발 현황

80년대 미국의 전략방위계획(SDI: Strategic Defense Initiative)의 빔 병기 개발의 일환으로 양성자 전류가 수십 mA급의 대전류 양성자가속기 기술이 개발되었다. 이 혁신적인 기술개발로 이전의 장치보다 빔 전류가 천배 내지는 만배의 큰 장치들이 가능하여져, 이제까지 빔 전류의 한계로 실현할 수 없었던 많은 과학적인 아이디어들을 실현할 수 있는 기틀이 마련되었다. 선진국에서는 이 기술을 곧 바로 활용하여 핵과쇄 중성자원(Spallation Neutron Source), 가속기구동 핵변환기술(ADS: Accelerator Driven transmutation System), 삼중수소의 생산(Accelerator Production of Tritium) 등 광범위하게 응용하기에 이르렀다. 핵과쇄 중성자원으로는 현재 미국 Oak Ridge 국립연구소에 2005년도 완공을 목표로 건설하고 있는 SNS(Spallation Neutron Source)와 유럽연합의 ESS(European Spallation Source)가 있다. 선진국들은 이 시설들이 완성되면 중성자과학(Neutron Science)이라는 21세기 과학기술 패러다임을 바꿀 새로운 학술 연구분야의 지평을 열 수 있을 것으로 기대하고 있다.

또한 이 기술은 현재 원자력산업이 직면해있는 핵폐기물 처리, 핵연료 자원의 한계성 등 여러 가지 현안 문제점들을 해결해 줄 수 있는 하나의 대안으로 고려되어, 각국이 이 분야의 기술개발에 박차를 가하고 있다. 주요 ADS 관련 가속기 개발프로그램으로 미국 Los Alamos 국립연구소의 AAA(Advanced Accelerator

Application), 일본 원자력연구소 및 고에너지 연구기관 공동으로 2006년 완공을 목표로 건설하고 있는 Intense Proton Accelerator 프로젝트 등이 있다. 또한 유럽핵공동연구소 CERN의 EM(Energy Amplifier), 프랑스의 GEDEON, 이태리의 TRASCO, 중국의 RCNPS 프로젝트 등이 추진 또는 계획 중에 있다

2.2 국내 개발 현황

국내에서 국제적 규모의 대형 가속기개발 사업은 1988년에 착공하여 1994년에 완공된 포항 방사광가속기 (PLS; Pohang Light Source) 사업을 들 수 있다. 이 가속기는 2 GeV 전자선형가속기 및 저장링으로 구성되어 있으며, 전자를 빛 속도에 근접하게 가속할 때 나오는 “빛”을 이용하는 장치로서 빛을 이용한 학술 및 물질분석 연구에 사용되고 있다.

또한 양성자가속기 개발 사업으로는 한국원자력연구소에서 추진중인 “대용량 양성자가속기 개발 프로젝트 KOMAC(Korea Multipurpose Accelerator Complex)”을 들 수 있다. 이 가속기는 대전류 양성자를 1GeV로 가속하여 양성자와 중성자를 대량으로 생산하는 장치로서, 향후 양성자공학과 중성자과학을 실현할 수 있는 장치로서 기초연구뿐만 아니라, 산업적, 의료용으로도 활용하도록 구성되어 있다. 이 사업은 1997년 7월부터 원자력 중장기 사업으로 1단계가 시작되어 현재 50keV, 40mA의 입사기 및 3MeV RFQ 가속기가 완성되며, 6MeV CCDTL은 개발은 2002년 3월경에 완성될 예정이다. 그리고 1단계에서 개발된 입사기 및 RFQ 가속장치를 사용하여, 산업용 이온빔 장치개발, 전도성 플라

스틱 개발, 지뢰 및 마약 탐지기술 개발 및 전력 반도체 개발 등 저 에너지 빔 이용기술도 동시에 개발되고 있다. 2단계는 1단계 연구개발의 경험과 설계자료를 토대로 하여 본격적으로 250MeV까지 본 장치 완성 및 이용시설 건설을 정부의 21세기 프론티어 사업으로 추진을 건의하고 있다.

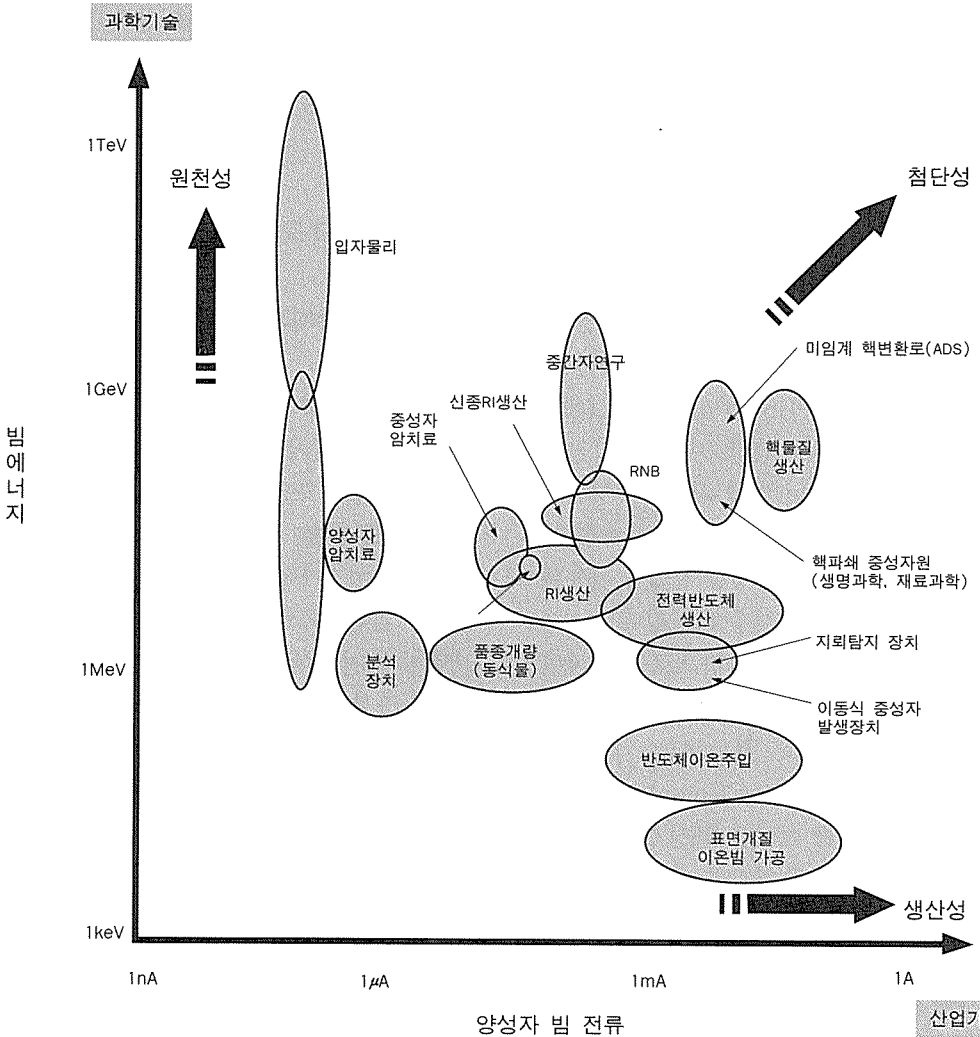
III. 가속기술과 산업

3.1 가속 장치기술과 산업

가속 장치기술은 한 시대의 첨단기술의 종합체로서 대형 전자석기술, 초정밀 가공기술, 초고전압 기술, 고진공 기술, 대전력 고주파 기술, 초전도 기술, 극저온 기술, 자동 제어 등으로 구성되며, 가속기 기술 보유는 곧바로 학술 연구는 물론, 의료적, 산업적, 군사적 응용 등 산업기술 전반에 걸쳐서 파급효과가 매우 크다. 따라서 새로운 가속기기술 개발은 경쟁국에 대하여 기술적 선도를 유지할 수 있었기 때문에 미국, 소련, 영국, 불란서와 전후 독일, 일본 및 70년대 이후의 중국, 인도 등이 자국의 첨단기술력 확보를 위하여 막대한 자금을 투입해 경쟁적으로 대형 가속기 프로젝트를 추진하고 있는 실정이다.

3.2 가속기 이용 응용기술과 산업

가속기는 빔 에너지가 높을수록 학술적인 쓰임새가 크며, 빔 전류 즉 입자의 수가 많을수록 생산성과 직결되어 산업적인 응용성이 크게 된다. 다음 그림은 양성자가속기의 빔 에너지와 빔 전류량에 따른 이용분야를 정리한 도표로서



양성자가속기 이용 분야

핵, 입자물리등 기초과학분야의 적용에서부터 전력반도체, 암 치료, 반도체 생산등 산업적용으로 그 활용성이 매우 넓음을 알 수 있다.

가속기 이용기술은 산업, 의료 분야에서 이

미 널리 사용되고 있다. 반도체 생산에 필수적인 양성자 및 이온 주입기와 정밀 재료분석장치들인 AMS(Accelerator Mass Spectrometer), RBS(Rutherford Back Scattering), PIXE(Particle Induced X-ray Emission) 등이

이 기술을 사용한 장비들이다. 최근 선진국에서는 이 기술을 응용하여 원자를 날개로 다룰 수 있는 나노급 가공장치의 개발도 서두르고 있다. 또한 지뢰 및 마약 탐지장치, 양성자 치료기, BNCT(Boron Neutron Capture Therapy) 장치 등 많은 새로운 용도의 장치 개발도 진행중이다. 다음은 양성자가속기의 몇 가지 가시적인 새로운 이용 응용분야를 소개하겠다.

1) 이온주입장치

이온주입장치는 100keV 이하의 낮은 에너지의 가속기를 사용하는 대표적인 응용분야이다. 원리는 물체에 양성자나 이온을 물체에 쪼여 표면층만 원하는 특성으로, 예로서 표면의 경도나 내마모성, 전기전도성을 향상시키는 등 특성을 바꾸는 것이다. 반도체 제조 공정에서의 불순물 도핑에는 필수적으로 이미 사용되고 있으며, 비 반도체 분야에서도 초정밀 시대로 접근하고 있는 현 시점에서 표면의 기능 향상은 그 중요성을 더해가고 있어, 이 기술의 활용도도 점차 넓혀져 가고 있는 추세이다. 국내에서는 소재의 표면 개질의 수단으로 주로 박막 코팅 기술을 사용하고 있으며, 이온 빔과 소재 간의 반응에 대한 연구는 낙후되어 제품 개발 및 상업화 된 예는 일부분에 한정되어 있는 실정이다. 그러나 미국, 일본 등 선진국에서는 빔과 소재간의 반응에 대한 많은 기초 연구가 수행되어 왔으나, 대량 생산에 적합한 대전류 장치를 사용한 예는 적어 상업화 실적은 지금까지는 많지 않은 실정이다.

종래에 개발된 keV급 이온주입기술로 표면을 개질한 결과 개질 층의 특성은 바람직하나 침투깊이의 한계로 개질 층의 두께가

너무 얇아 제품에 따라 그 적용이 제한되어 왔다. 따라서 개질 층의 두께를 증가시키기 위한 수 MeV의 고에너지 이온을 사용한 기술개발은 고기능, 고부가가치의 금속, 고분자 및 세라믹 소재개발에 광범위한 적용이 있을 것으로 예상된다.

2) 미세가공장치

미세가공장치는 가속된 빔을 고분자나 세라믹 재료에 조사하여 원자단위의 크기로 가공하므로써, 큰 선폭 대 깊이의 비측 Aspect Ratio를 얻을 수 있는 방법으로 MEMS(micro-electromechanical system) 등에 적용할 경우 넓은 응용성이 기대되는 분야이다.

지금까지 반도체 식각(Lithography)기술은 주로 자외선을 사용하여 수행하고 있으며, 이 기술은 선폭 최고 약 0.07 μm 까지 가능하나 곧 기술의 한계에 도달할 것으로 예상된다. 따라서 차세대 기술로 선폭 0.01 μm 까지 식각할 수 있는 방법으로 전자 빔 또는 양성자 빔을 이용하는 방법이 대두되고 있다. 양성자빔 방법은 전자빔 보다는 상대적으로 질량이 큰 양성자를 사용하므로 그 정밀도의 향상으로 인하여 차세대 식각기술로 유력할 것으로 보고있다.

3) 의료용 및 신중 동위원소 생산장치

방사성동위원소는 주로 원자로와 가속기로부터 생산된다. 원자로에서 생산되는 핵종은 중성자 파잉 동위원소인데 반하여, 양성자가속기에서 생산되는 것은 양성자 파잉 핵종으로서 그 쓰임새가 다르며 서로 보완적이다. 현재 국내 동위원소 시장은 연 평균 15% 이상 성장으로 비교적 성장속도가 빠르고, 최근 암의 동역학적인 진단과 치료에 이용하는 PET(Positron

Emission Tomography) 및 SPECT의 도입이 급속히 증가함으로 이에 이용할 수 있는 양성자가속기로 생산되는 단수명 동위원소 수요가 점증하고 있다. 그러나 가속기 동위원소 생산시설의 미비로 서울 지역의 3개 병원 정도가 제한적으로 장비를 보유하고 있는 실정으로 RI 공급이 충분하다면 보다 많은 병원들이 PET장비를 설치할 것으로 예상된다. PET용 동위원소의 수명은 수분에서 길어야 수시간 정도이므로 생산 후 장거리 공급이 곤란한 관계로 유럽 등 선진국에서는 지역적인 PET 센터를 건설, 운영 중에 있으며, RI 생산장치인 가속기를 컨소시엄 형태로 운영하고 PET장치만을 병원단위로 설치하고 있다.

최근에는 100~250MeV의 고 에너지 양성자를 이용한 새로운 동위원소 생산 및 이용기술 개발이 일본을 위시하여 활발하게 연구되고 있다. 개발되고 있는 기술은 새로운 PET용 동위원소 (Ge-68, As-72, Sr-82 등) 생산기술, 신종 추적자 동위원소 (Mg-28, Fe-62, Tc-95m 등) 생산기술, 신종 치료용 동위원소 (Sc-47, Cu-67, Xe-125 등) 생산기술 및 신종 동위원소 화학적 분리기술 및 대전류 양성자 동위원소 표적처리기술 개발 등이다. 현재 캐나다의 TRIUMF에서는 500MeV 양성자를 이용하여 신종 의료용(PET용, 추적자용, 심장, 폐 치료)과 산업용(추적자) 동위원소를 생산 중에 있다.

4) 전력반도체 생산장치

전력반도체는 산업전자, 고속전철 등 전력전 분야에 주로 사용되는 다이오드, GTO, IGBT 등 소자이며, 양성자를 이용하면 소자의 스위칭, 전류-전압, 온도특성 등을 탁월하게

향상시킬 수 있어 이에 대한 연구개발이 활발히 이루어지고 있는 분야로서, 최근 실용화되어 그 응용 영역이 점차 확대되고 있다. 최근 기술개발 추세는 낮은 온-전압, 빠른 스위칭 속도를 요구하고 있으며, 여러 특성(온-전압, 스위칭 특성, 내전압 등) 사이의 trade-off를 맞추기 위한 설계 및 공정기술이 개발되고 있다. 이러한 기술 중 핵심은 반도체 소자의 이송자 수명 제어기술이다. 현재까지는 금, 백금 등을 이용한 기존의 천이금속 확산방법을 사용해 왔으나 그 특성의 한계로 소자 특성의 최적화가 가능하고, 생산성이 우수한 양성자 조사 방법이 보편화되고 있는 추세이다.

국내에서는 고속 스위칭 반도체 소자의 핵심기술인 이송자 수명제어 기술 연구가 초보적인 실정이며, 미국 GE사에서는 1986년에 IGBT에 적용한 이후 미국, 일본 등 선진국에서 대용량 소자 개발에 적용하고 있으며, 특히 일본은 양성자빔 조사 시설을 지역별로 운영하고 있다.

5) 양성자 암치료기

양성자 암치료는 전자나 중성자 암치료와는 달리 정상 세포 파괴가 거의 없이 국소 부위의 암세포만 사멸시키므로써, 부작용이 적은 방법으로 알려져 있다. 특히 눈의 흑색 종양, 심부장기암 폐암, 식도암, 간암의 치료에 효과가 있다고 보고되고 있다. 이외에도 뇌하수체 종양, 뇌내 동정맥 기형, 두개저나 경추의 척색종, 연골육종, 우복강매 종양, 전리선암 등의 치료에도 상당한 효과가 있음이 알려져 있다. 미국 Loma Linda 병원은 양성자가속기 전용치료 시설로 4726명 치료(1990~1999)한 실적이 있다. 보통 양성자 암 치료기는 가속기, 빔 수

송장치, 양성자 암치료기(Gantry), 2차원 양성자 치료 스캐너, 양성자 조사부위 3차원 추적/영상 장치 등으로 구성된다.

현재 국내에서는 양성자 치료기는 전무한 실정인데 비하여, 전세계적으로 23개 양성자 암 치료 센터가 운영되고 있으며, 일본은 2003년까지 4개 시설의 준공을 목표로, 중국에서는 2개 추진 중에 있으며 2005년까지 22개를 추가 건설할 계획이다. 국내에서도 국립암센터 등에서 250MeV 양성자가속기와 치료기를 설치할 계획으로 알려져 있으며, 지속적으로 수요가 증가될 것으로 예상된다.

6) 우주/항공소자 내 방사선 특성시험

지구 대기권 밖에서는 지상에서는 존재하지 않는 각종 방사선이 태양 및 다른 천체로부터 발생되어 존재한다. 이를 우주환경 방사선이라고 부르며, 그 종류는 1) 태양광 : 자외선, X-선, 감마선 2) 반알렌대 : 전자 및 이온 (수백 keV ~ 수 MeV) 3) 우주선 : 고 에너지(>100 MeV) 하전입자(양성자 85%, α입자 14%, 중이온 1%)으로 구성되어 있다. 보통 600km의 궤도를 선회하는 상업용 위성(우리별, 무궁화)은 내측 반알렌대를 통과하며, 이 안에 갇혀 주기적인 운동으로 남극과 북극을 이동하는 하전 입자에 의해 부품이 손상되고 수명이 단축되는 악 영향을 받고 있다. 그중 방사선에 의한 SUE (Single Upset Effect) 등은 우주선에 탑재된 반도체 소자의 오동작 유발의 원인이 되고 있으며, 또한 항공기 제어용 반도체의 경우도 우주 방사선에 의한 오동작 유발로 국제적으로 항공우주 소자의 내방사선 규격이 점점 강화되고 있다. 또한 항공기 승무원이 일반인보다 암 발생 비율이 높은 것으로 알려져 있으

며, 이는 태양 방사선이 대기과 충돌하면서 발생하는 이차 중성자에 의한 인체 피폭에 기인하는 것으로 생각되고 있다.

따라서 우주/항공소자의 내 방사선 특성향상 연구와 품질 인증은 필수적이며, 이를 위하여는 지상에서 우주환경을 재현할 수 있는 100MeV 이상의 대용량 양성자가속기 시설이 필요하다. 이는 또한 우주/항공소자의 SUE 기구 규명과 위성용 태양전지, 반도체소자 등 우주/항공 재료, 우주환경에서 인체의 생화학적 영향연구, 우주환경에서 생물의 영향 연구 등에도 필요하다. 국내에서는 가속기 및 관련 설비가 없어 해외에서 품질인증을 고가로 의뢰하고 있는 실정이다. 이 분야는 현재 러시아의 미르호의 노후로 새로운 국제적 우주정거장 건설이 추진 중이며 2005년 완공예정으로 있어 향후 신 산업분야로 평가되고 있다.

7) 특정 원소탐지장치

화약류 폭발물에는 다량의 질소가, 코카인 등 마약류에는 다량의 염소가 함유되어 있어 이를 식별할 수 있다면 정확하게 대상물을 탐지할 수 있게 된다.

지뢰 등 폭발물 탐지원리는 비교적 낮은 1.75MeV 에너지를 갖는 양성자를 탄소(^{13}C) 표적에 쪼이면 9.17MeV의 감마선이 방출되고, 이 특정 감마선이 폭발내 질소 원자핵과 반응하여 흡수된 후 재 방출됨을 이용하여, 질소가 어디에 모여있는지를 찾아내므로서 폭발물을 감식할 수 있는 새로운 기술이다. 마약 탐지는 황(^{34}S)을 이용하여 유사한 방법으로 이루어지며, 현재 이 원리를 이용한 탐지장치가 한국 원자력연구소에서 개발 중에 있다.

이를 사용하면 공항, 항만 등에서의 화물의

대량 검색이 가능하며, 땅 속에 깊이 묻힌 지뢰도 감마선의 깊이 침투하는 특성을 이용하여 쉽게 찾을 수 있게 된다. 특히, 우리나라는 비무장지대에 100만개 이상의 지뢰가 매설되어 있어, 현재의 기술로는 약 30 ~ 100억불 정도의 제거 비용이 소요되는 것으로 추정하고 있으나, 이 장치가 실현되면 제거 비용을 대폭 절감할 수 있을 것으로 전망된다.

8) 이동형 중성자발생 장치

중성자는 물질을 쉽게 투과하고, 특정 원자핵에 잘 흡수하는 성질을 이용하여, 비파괴 검사용 중성자 라디오그래피나 암 치료 등 산업 의료분야에 쓰임새가 많다. 그러나 기존 중성자원은 원자로에서 얻거나 또는 ^{252}Cf 등 방사성동위원소 등을 이용하였다. 그러나 원자로는 이동이 불가능하여 대상 물질을 원자로에 접근해야 되므로 산업에 매우 제한적으로 사용되어왔다. 또한 방사성동위원소를 이용한 중성자원은 이동이 가능하나 중성자속이 매우 약하여 역시 사용에 한계가 있다.

그러나 에너지가 2~3 MeV급의 소형 대전류 양성자가속기를 사용하면 다량의 중성자를 쉽게 생산할 수 있어, 중성자가 요구되는 여러 응용에 널리 사용될 수 있다. 이에 따라 비파괴 검사, 붕소포획 암치료기술(BNCT) 등에 적용될 양성자가속기를 사용한 이동형 중성자발생 장치가 개발되고 있으며 일부는 실용화되고 있

다. 이러한 장치는 사용할때만 가속기를 작동시켜 중성자를 발생시키는 장치이므로 관리상 간편하며, 동위원소 중성자원과 같이 지속적인 관리를 요하지 않는다.

IV. 맺는 말

앞서 살펴본바와 같이 이제 가속기기술은 연구용에서 벗어나 산업용로서 다양한 신기술, 신제품을 개발하는데 사용되는 단계에 이르렀으며, 향후 보편화 될 새로운 산업분야이다. 현재 산업용 전용 가속장치와 이용기술의 개발이 선진국에서 진행되고 있어, 곧 여러 응용분야에 적용될 것으로 전망된다. 또한 이러한 산업적 파급효과 이외에도 핵폐기물 처리, 생명과학, 재료과학, 나노기술 연구에 사용하는 등 원천기술 개발에도 꼭 필요한 장치이다. 특히 국내에서 상당부분의 기술자립이 이루어진다면 국내의 초정밀 가공기술, 초고진공 기술, 대출력 고주파기술, 극저온 기술, 초전도 기술, 초고전압 기술, 초고속 네트워크 기술, 컴퓨터 제어 기술 등 기반 기술에 대한 기술력을 전반적으로 한 단계 높이는 계기도 마련될 수 있을 것이다. 따라서 국내에서도 이 분야의 국제경쟁력 확보차원에서 기술 추적과 개발이 시급하다고 본다. **KRIA**