Journal of Radiation Industry 6 (1) : 101~110 (2012)

Technical Paper

방사선 산업용 가속기의 현황과 전망

채 종 서*

성균관대학교 에너지과학과

The Status and Prospects of Accelerators in Radiation Industries

Jong-Seo Chai*

Department of Energy Science, Sungkyunkwan University, Suwon 446-746, Korea

Abstract - This paper is described the review of several selected accelerators and the use of accelerators in various purposes. The electrostatic accelerators and RF accelerators have been developed before the second world war for the purpose of basic research of physics mainly. RF driven accelerators have been achieved higher energy and applied in medical and industrial use after 1980's. Accelerators have improved incorporating new technologies : axial and horizontal injection, stripping extraction, superconducting RF, computer control, superconducting magnet etc.. Also recent key technologies as BT and NT make the expansion of applications of the accelerators.

Key words : Accelerator, Irradiation, Cyclotron, Linac, Synchrotron

서 론

1895년 독일의 빌헬름 뢴트겐 (Wilhelm Roentgen)은 내부를 열어 보지 않고 물체 내부의 정보를 획득할 수 있는 X선을 발견 하였다. X선을 발견 한 이듬해인 1896년부터 많은 의학자 들은 뢴트겐의 X선을 질병의 진단에 활용하기 시작하였다.

이후 X선 등의 방사선은 높은 에너지의 입자 빔에서 획득 할 수 있다 (Slepian 1928)는 사실을 인지하면서 과학자들은 입자 빔의 에너지를 높일 수 있는 입자 가속기들을 개발 하였다 (Van de Graaff 1931).

1931년 Cockcroft와 Walton은 높은 직류 전위차를 이용하여 정전형 가속기를 개발하였고 (Cockcroft and Walton 1932) 같은 해에 미국의 E.O. Lawrence는 Wideroe가 발표한 고주파 공진의 가속 원리를 적용한 사이클로트론을 발명하였다 (Lawrence *et al.* 1931).

세계 2차 대전 후 가속기 기술의 발전은 급속히 높은 에너지의 전자빔 (McMillan *et al.* 1945) 을 만들 수 있게 되어 짧은 파장의 X선 장치들이 개발 되었다. 단파장의 고밀도 X선은 암 치료 등에 효과가 좋아 여러 형태의 장치들이 개발되었다 (Scharf 1986). 특히 방사선 치료기 분야에서 가속기의 이용은 더욱 활발하여 로봇 팔과 전자가속기를 결합한 치료 장치인 사이버나이프 (Cycler Knife), 방사선 영상 유도치료기인 IGRT (Image Guided Radiation Therapy), 방사선 단층 치료기 (Tomo Therapy), 강도조절방사선치료기 (IMRT: Intensity Modulation Radiation Therapy) 등 첨단 방사선치료기법과 장치가 개발됨에 따라 방사선 치료용 선형가속기의 수요가 꾸준히 증가하고 있다.

감마선을 주로 이용하고 있는 추적자 중심의 핵의학

* Corresponding author: Jong-Seo Chai, Tel. +82-31-299-4590, Fax. +82-31-299-4667, E-mail. jschai@skku.edu

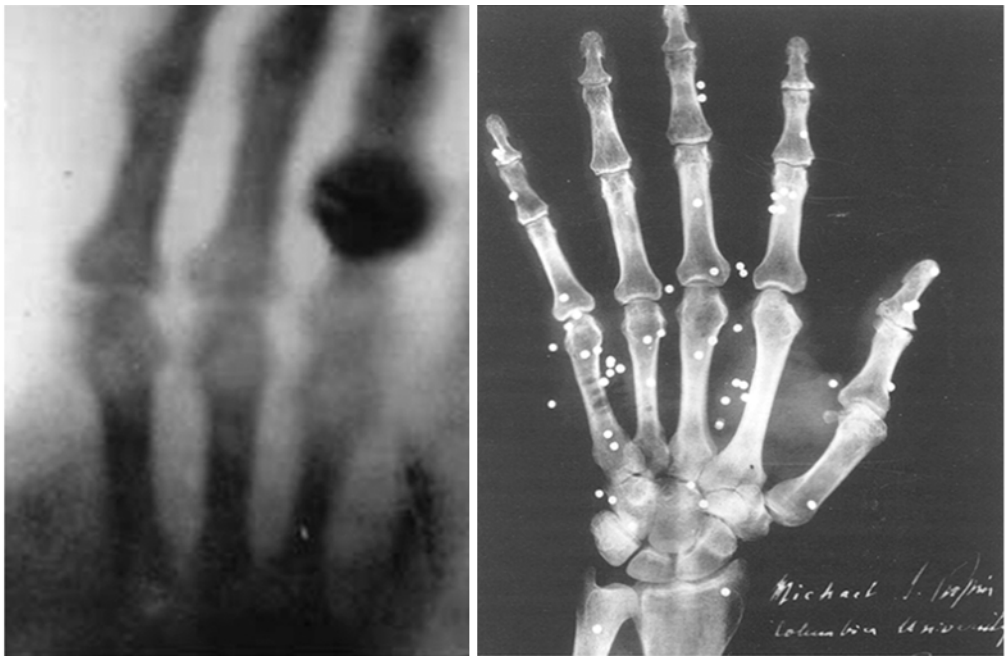

Fig. 1. X-ray photo by W. Roentgen in 1895 (left) High resolutive X-ray photo at New York hospital in 1896 (right).

영상 시장도 분자영상 의학시장 확대에 따라 의료용 가속기 수요가 증대되고 있다. 2006년 보고된 IAEA (IAEA DCRP-2006)에 따라면 IAEA 미가입국을 포함하여 전 세계적으로 약 1,350여대의 사이클로트론이 운영 중에 있다. ^{18}F, ^{11}C와 같은 단 반감기 방사성 동위원소를 사용한 암 진단법의 활성화에 따라 사이클로트론-PET 스캐너를 이용한 진단 시설이 꾸준히 증가하고 있으며, FDG의 판매 시장이 확대되고 있다. 의료용 뿐만 아니라 비파괴 검사와 재료처리와 물질 분석을 위한 소형의 입자 가속기들이 개발되어 상업화 되어 생산 판매되고 있다.

본 논문에서는 앞서 기술한 X선과 감마선을 발생 시킬 수 있는 저에너지 중심의 산업용 가속기의 종류와 생산 및 시장 현황과 향후의 가속기 산업을 분석하였다.

가속기의 종류

입자 가속기는 형태에 따라 선형 (linear)과 원형 또는 환형 (circular)으로 나뉘며 가속 에너지 구동 방법에 따라 정전형과 고주파 (RF)형으로 구분된다. 가속 입자에 따라 전자와 이온으로 분류되며 이온은 상태에 따라 안정이온과 불안정 이온인 방사성 이온으로 분류 된다.

1. 정전형 가속기 (Electrostatic Accelerators)

정전형 가속기는 하전 입자에 높은 전위를 가진 DC 전압을 대전하여 입자의 에너지를 높이는 형태의 가속기이다. 전위를 높이는 전원장치의 종류에 따라 Cockcroft-Walton 정전형 가속기와 Van de Graaff의 정전형 가속기가 있다.

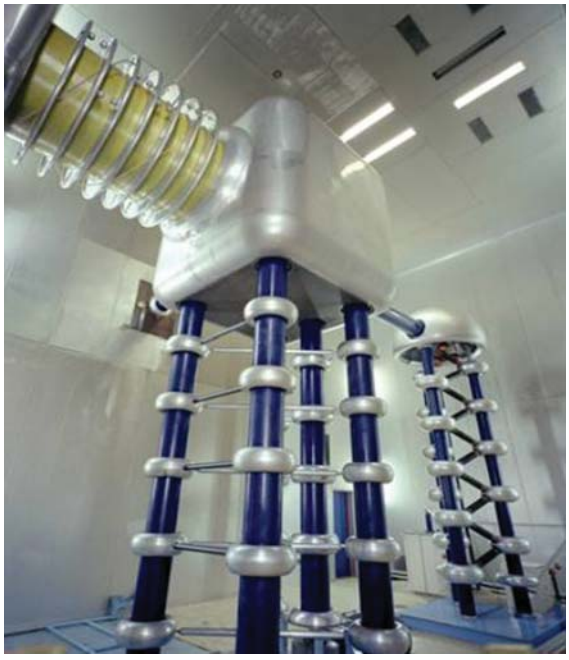

Fig. 2. The Cockcroft-walton accelerator at the National Accelerator Laboratory in Batavia, Illinois (Courtesy of NAL).

2. Cockcroft-Walton 정전형 가속기

Cockcroft-Walton 가속기는 직류고전압을 만들기 위하여 축전기와 정류기를 조합한 배전압 정류회로를 갖는 가속기이다. 1932년에 처음 제작된 Cockcroft-Walton 가속기는 최초의 핵변환을 성공시키는 데 활용되었다. 최근에는 반도체 정류기의 발달로 소형화되어 가속기 전체를 고압탱크에 넣어 고압가스를 채워 가속전압을 13 MeV로 올려 사용한다. 이온 beam 가속기의 전치 가속단으로 많이 사용된 Cockcroft-Walton 가속기는 최근 빔 전류 세기와 제작비, 크기 및 유지 보수 등의 장점이 더 많은 RFQ (Radio Frequency Qudrupole)로 대치되고 있는 상황이다.

3. 반데그라프 (Van de Graaff)와 탄뎀형 가속기 (Tandem Accelerator)

Van de Graaff 가속기는 직류 고전압을 정전기 전기로 발생시키는 가속기로 고압탱크 속에 하전용 벨트, 고전압 전극, 이온원, 가속관 등이 있으며, 이온, 전자 모두를 가속시킬 수 있다. 고압탱크 속에는 질소, 이산화탄소 등의 가스로 10기압 정도를 유지하고 있다. 최근에는 양성자를 20 MeV까지 가속하는 Tandem형 Van de Graaff 가속기가 있다.

4. 유도전기장이용 가속기 (Induction Accelerator)

자기선속의 변화를 주었을 때 생기는 유도전기장을 이용하여 전자를 가속시키는 가속기이다.

1) 유도전기장 선형가속기 (Induction LINAC)

외부전류원이 회로를 통해 방전되어질 때 빔의 진행 방향을 따라 유도되는 전기장을 이용하여 전자를 가속시키는 가속기이다. Induction linac은 높은 세기의 짧은 펄스형태의 beam을 가속시키는 데 사용된다.

2) 베타트론 (Betatron)

높은 전압을 사용한 효과를 이용하여 전자를 가속하는 가속기의 하나로 둥근 교류 전자석의 극을 마주 놓고 자기장을 변화시킬 때 그 극의 주변에 따라 생기는 유도 기전력을 이용하여 전자 빔을 가속한다.

5. 고주파 가속기 (Radio-Frequency Accelerators)

고주파의 전기장으로 고전압을 생성시켜 입자를 반복적으로 가속시키는 방법으로 최종에너지까지 가속전압을 인가시켜 에너지를 상승시키는 방식으로 선형가속기 (linac)와 자기장을 이용하여 입자를 원형으로 가속시키는 싱크로트론과 사이클로트론 등이 있다.

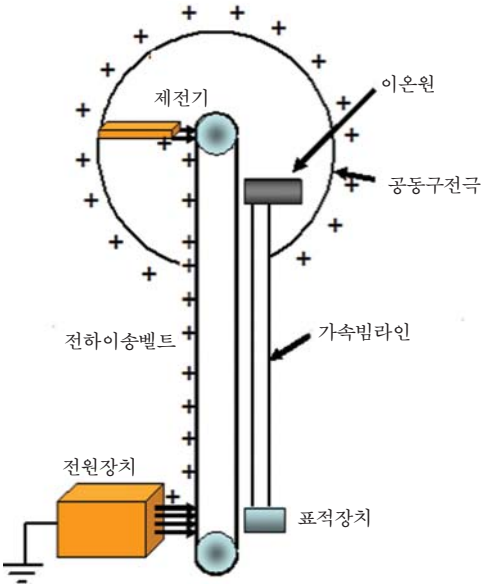

Fig. 3. Conceptual Diagram of Van de Graaff.

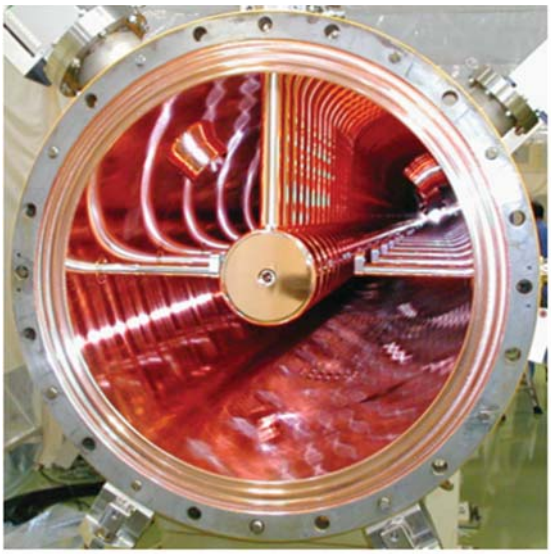

Fig. 4. The inside of Drift Tube Linac.

1) 선형가속기 (LINAC)

여러 개의 고주파 전극을 통하여 고주파 전압을 반복하여 하전입자에 인가하여 가속시키는 것으로 진동하는 고주파 전압 중에서 하전 입자의 운동과 전극 배치를 조화시켜 가속 위상만을 끄집어내어 하전 입자를 가속시킨다. Linac은 펄스 (Pulse)와 CW (Continuous Wave)의 고주파를 인가할 수 있다. 따라서 RF에 펄스를 인가 할 경우 가속 이온빔은 펄스형이되고 CW를 인가하였을 경

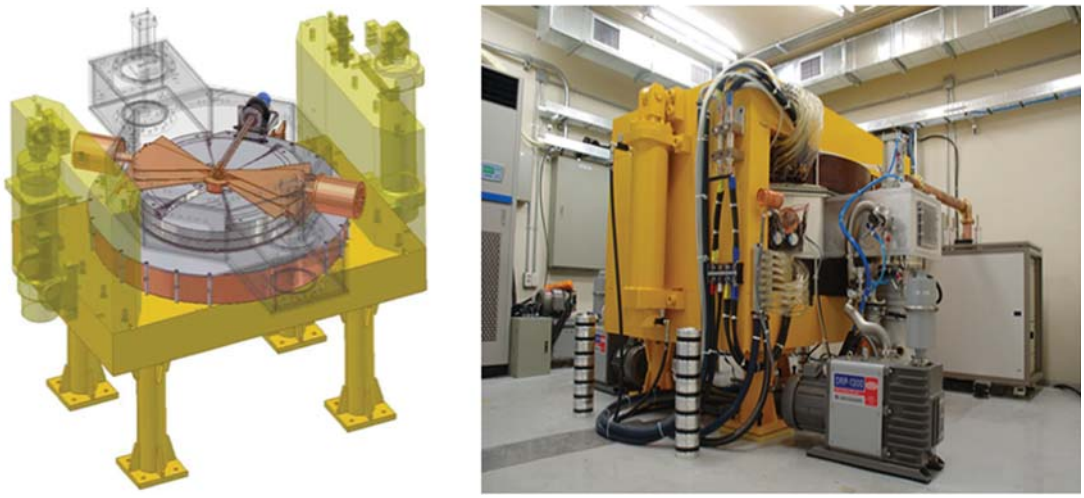

Fig. 5. The 1st Medical Cyclotron, KIRAMS-13, in Korea (Courtesy of KIRAMS).

우 CW형이 된다.

2) 사이클로트론 (Cyclotron)

사이클로트론은 원형의 자석사이에 두 개의 반원형 고주파 전극을 설치한 것으로 고주파 전극에 고주파 전압을 걸어서 이온을 전극 사에서 교번시켜 가속시킨다. 일정한 자장 속에서 이온은 등속도 원운동을 하기 때문에 이온은 에너지 크기에 따라 속도가 다르나 궤도의 원주 길이 또한 달라 일정하게 등시성 (Isochronism)을 유지 한다. 이때 이온은 가속 전극 사이를 통과할 때마다 고주파 전기장에 의해 가속되어 이온의 회전반경은 차츰 커지고 나선 모양의 궤도를 그리면서 고에너지로 가속된다.

3) 싱크로트론 (Synchrotron)

입사기 (Injector)가 하전 입자 빔을 가속 링에 보내면 가속 링 내의 휨자석 (Bending Magnet)들에 의해 입자들을 원운동으로 유도하고 RF 전극에서 가속이 이루어지며 사극자석 (Quadrupole Magnet)과 이극자석 (Dipole Magnet)에 의해 빔 집속이 이루어진다. 빔의 실제 경로는 원운동을 하는 동안 가속과 휨, 집속 등의 작용이 반복적으로 이루어진다. 휨 자석은 빔의 경로를 유지하도록 빔의 속도에 따라 자기장을 변화시키는데 하전입자의 속도가 커질수록 자기장의 세기 또한 커져 항상 하전 입자의 원운동 궤도를 유지시킨다.

Synchrotron에 사용되는 가속 빔은 다른 가속기와 마찬가지로 전자와 이온빔이 가능하다. 원형으로 하전입자가 가속운동을 하게 되면 synchrotron radiation이라 불리는 전자기파를 방출하게 되어 전자와 양성자는 원형가속기에서 원운동을 하면서 에너지를 잃어버리게 된다.

Fig. 6. Photo of alternating gradient synchrotron at Brookhaben National Laboratory in USA (Courtesy of BNL).

따라서 처음에는 이러한 이유로 무게가 가벼운 전자를 가속하지 않고 양성자나 다른 이온들을 가속하였다. 그러나 전자에 의해 발생하는 방사선이 파장이 짧은 X선으로 방사선의 선질을 높여 고체, 화학, 생물 분야의 내부 분석에 많은 장점이 있어 현재 널리 사용한다.

가속기의 산업 분야

1. 금속 재료 가공

정밀 금속 재료나 기계 부품들은 전자빔 가속기를 이

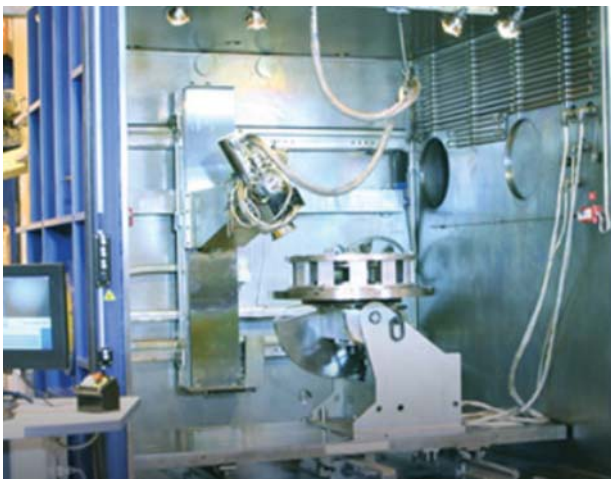

Fig. 7. High precision mechanical components processing with low energy electron beam accelerator (Courtesy of Sciaky Inc.).

Fig. 8. Electron accelerator for radiation cross linking (Courtesy of Electron Crosslinking AB).

용하여 정밀 처리를 할 수 있다. 정밀 재료 처리에 사용되는 전자선 가속기는 비교적 낮은 에너지로 30 keV에서 200 keV 내외이지만 빔 출력이 약 200 kW에 도달 할 정도의 높은 출력을 갖는다. 전자빔 재료 처리 응용은 1905년부터 시작 되었다. 이 처리 기술은 자동차 부품의 용접 부위나 경화가 필요한 부분 그리고 고속의 기어 부분에 많이 이용된다. 또한 직경 0.55 mm 내에 초당 3,000개의 구멍을 내는 초정밀 드릴링이나 커팅에 이용하는 초정밀 가공용 금속 처리에 이용되므로 자동차 공업은 물론 정밀 의료기기 및 우주 공학 기술에 사용된다.

2. 방사선 가교 및 소독

전자빔 조사는 화합 물질의 방사선 가교에 응용 할 수 있다. 전자 가교의 결과로 전송선이나 전력선의 피복에 전자빔을 조사하면 내열 및 절연이 향상 되어 고신뢰성 선로 피복제를 생산할 수 있다. 또한 전자빔 조사는 자동차 타이어 산업에도 적용이 가능하여 타이어 수명 연장에 큰 효과를 나타내고 있다. 전자 빔은 방사선 가교 뿐만 아니라 상처부위의 소독과 치료를 위하여 사용되는 하이드로겔 (Hydrogel)의 생산에도 활용 가능하다. 주사기, 장갑, 주사기, 카테터, 유체 백, 반창고, 외과용 가운, 타월, 튜빙 등 여러 종류의 의료 용품들의 소독에 활용된다.

전자 가속기에 의한 빔 조사 비용은 미국에서만 연간 500억 불로 거대한 방사선 시장이 형성되어 있다. 전자빔 조사용 가속기는 에너지의 크기에 따라 저에너지, 중에너지, 고에너지형으로 구분된다. 저에너지형은 400 keV 이하의 에너지를 갖는 자체 차폐형의 DC 정전형 가속기로 단선의 케이블이나 얇은 필름이나 라미네이트 등의 가교 등에 사용된다.

Table 1. List of electron accelerator companies for radiation cross linking and sterilization

Manufacturer	Nation
EB TECH Co., Ltd.	Korea
Electron Crosslinking AB	Sweden
Energy Sciences, Inc.	USA
Wasik Associates	USA
Advanced Electron Beams	USA
L-3 Communications Pulse Sciences Division	USA
D. V. Efremov Institute	Russia
PCT Prod. & Mfg	Germany
IBA Industrial, Inc.	Belgium
Nissin High Voltage Corporation	Japan
Denki Kogyo Co, Ltd.	Japan
IHI Corporation	Japan
Vivirad	France
Gettinge Linac	France
Mevex	Canada
Budker Institute of Nuclear Physics	Russia

중에너지형은 DC 정전형과 고주파형의 가속기로 400 keV에서 5 MeV 이내의 에너지이다. 주로 의료용품, 타이어, 고무, 플라스틱 등 어느 정도의 두꺼운 폴리머 계열의 가교나 소독에 이용된다. 중에너지의 대표적인 상업용 가속기는 정전형의 Dynamitron과 BINP사의 ILU 등이 있다.

5 MeV 이상 10 MeV의 고에너지 전자 가속기는 의료 생산품의 대규모 소독에 이용되며 물론 식품조사, 폐수처리 등의 물의 재활용에도 이용된다. 고에너지 가속기

는 주로 RF형의 가속기로 RF선형 가속기와 Rhodrotron이 대표적인 가속기이다.

3. X-선 검색용 가속기

비파괴 검사용 가속기의 활용이 확대 되어 공항, 항만 등의 밀수 및 화약 무기류의 검색이 주종을 이루게 되었다. 특히 9/11 테러 이후 세계 보안검색 시장은 가장 빠르게, 안정적으로 성장하고 있는 시장중의 하나임. 미국에서는 자국 내 공항을 통과하는 모든 수화물에 대해 100% 검색을 시행하는 법안을 2002년에 제정하였으며,

Fig. 9. IBA Rhodrotron (Courtesy of IBA).

2007년에는 자국으로 반입되는 해운/항공 컨테이너 화물을 100% 외국 항만에서 방사선 정밀 검색하도록 의무화 (9/11 테러대책 권고 이행법률)하고 현재 그 시범사업을 시행하고 있다. 이러한 국제 교역환경 변화에 대비하여 미국에서는 SAIC, RAPISCAN, L-3 Communications 등 관련 회사를 주축으로 컨테이너 검색기 1,000대를 공급하기 위한 Project (프로젝트)를 수행하고 있다. 국내 공항에서도 대테러 방지를 위한 강력한 의지로 '테러에 대해 단 0.1%의 의심사항이라도 간과할 수 없다'는 보안 의식을 강조하고 있고, 약 1,400억 원 규모의 인천공항 2단계 보안 시스템 통합 사업을 추진 계획이며 서울역~인천 간 공항 철도 보안시스템이나 인천공항 화물검색을 위해서도 X-선 검색시스템 도입을 추진하고 있어, 이러한 분위기에서 보안 산업분야의 기술개발 수요는 매년 가파르게 상승하고 있다. 이러한 검색장비의 방사선원은 전자 가속기를 이용하고 있다. 사용되는 전자 가속기는 1~16 MeV의 높은 에너지를 가진 가속기가 이용된다.

검색용 전자 가속기를 공급하고 있는 대표적인 회사로는 미국의 Varian Medical Security & Inspection Products와 중국의 NUTECH이 있다. 이외에도 L & W Research (USA), HESCO (USA), EuroMeV (France), MEVEX (Canada), JME Ltd. (UK) 등이 있다.

4. 이온 주입용 가속기

이온 주입법은 열평형이 아닌 상태에서 순간적으로 물질을 합성하는 것이다. 물질을 이온화하고 가속기를 사용하여 일정한 에너지로 높인 이온을 물질에 조사하면 물질에 이온을 주입시킬 수 있다. 일반적으로 물질

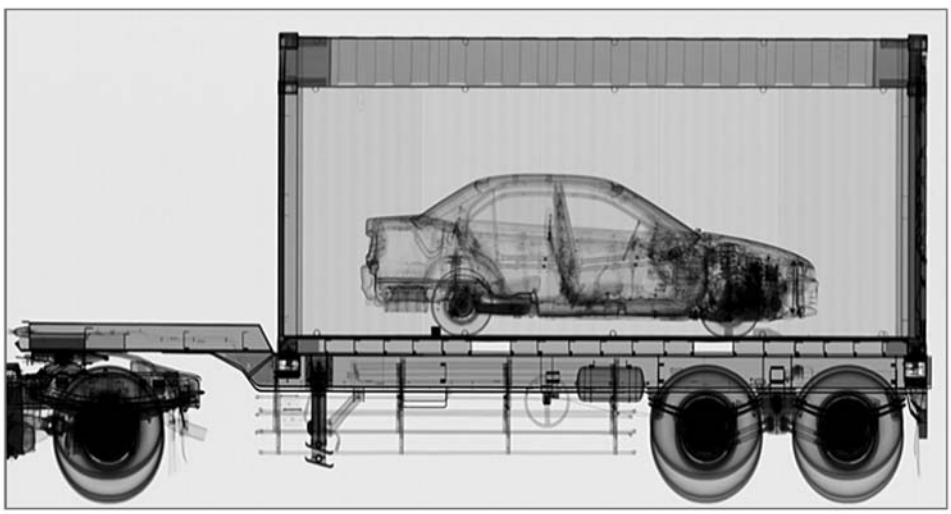

Fig. 10. Non destructive image for Cargo tailor by VARIAN inspection system (Courtesy of Varia Inc.).

합성을 할 때 새로운 물질을 만들어 내려면 극한 상태를 만들어 내는 것이 가장 효과적이다. 극한 상태에서 임의의 고온이나 임의의 고압을 가하면 원자 배열 및 조합이 발생하여 신물질이 생성된다. 생성된 신물질은 상온 상압 하에서 변화된 상태를 유지하며 안정하게 존재할 수 있다. 예를 들어, 다이아몬드 등에서의 결합 상태는 고온 고압 하에서만 가능하지만 상온 상압 하에서 충분히 안정한 상태로 존재하고 있다.

큰 운동 에너지를 가진 이온이 물질 중에 주입되면, 그 에너지가 열에너지로 변환 되는 과정에서 일부 고온, 고압을 발생시킬 수 있다. 주입할 수 있는 이온은 거의 모든 원소의 이온을 이용할 수 있어 각종 물질에 이온 주입이 가능 하다. 국소적으로는 고온 고압을 발생하고 있음에도 불구하고, 전체 시스템으로서는 상온에서 조작할 수 있다는 것이 이온 주입법의 특징이다.

이온 주입법은 물질 합성을 위한 새로운 방법으로 산업적 이용 가능성은 매우 크지만, 실제로 각종 소재에 대해 이온 주입법을 적용할 때에는 각각의 경우에 대응하여 특수한 연구가 필요하다. 즉, 원리적으로는 비교적 간단하지만, 공업 기술적으로 해결 하여야 하는 부분이 있다. 이온 주입이란 앞서 기술한 바와 같이 이온을 가속하여 물질에 조사하는 것이므로 어떤 형태의 가속기를 사용하여도 원리적으로는 가능하다.

그러나 주입된 이온이 고체 표면보다 어느 정도 심부까지 도달할 수 있는지가 중요하므로 가속전압이 이온 주입의 중요한 요인이다. 따라서 요구되는 가속전압은 kV급에서 MV급이다. 반도체 소자용은 수백 kV가 요구되고 공업재료는 수 MV에서 수십 MV까지 필요하다. 현재 이온 주입용 가속기를 생산 판매 공급하는 회사는 Table 2와 같다.

현재 이온 주입용 가속기는 반도체 분야의 CMOS 제조 공정과 디지털 카메라용이나 핸드폰의 사진기의 CCD (Charge Coupled Device) 및 CMOS (Complementary-symmetry Metal-Oxide-Semiconductor) 영상 소자 그리고 광전 태양전지의 생산에 필요한 실리콘 소자의 생산에 사용된다. 이외에도 마찰을 최소화하는 금속 재료와 생체 재료 개발에 사용된다.

Table 2. List of manufacturer of ion implantation

Manufacturer	Nation
Varian Semiconductor Equipment	USA
Axcelis Technology	USA
SEN Corp	Japan
Nissin Ion Equipment Company	Japan
Ulvac Technologies & IHI Corp	Japan
China Electronics Technology Group	China
Ibis Technology	USA
Advanced Ion Beam Technology	USA
HVEE B.V.	Netherland
National Electrostatic Corporation	USA
Danfysik	Denmark

5. 방사성 동위원원소 생산용 가속기

방사성 동위원소를 생산하는 가속기는 양성자와 중양자를 가속시킬 수 있는 RF선형 가속기와 사이클로트론의 형태의 가속기이다. 상업적으로 이용되는 방사성 동위원소는 중성자과잉핵종과 양성자과잉핵종으로 분류되는데 중성자과인핵종은 원자로에서 생산 할 수 있고 양성자과잉핵종이 가속기를 이용하여 생산 가능하다.

가속기로 생산할 수 있는 방사성 동위원소는 양전자 방출 핵종과 감마선 방출 핵종으로 구분된다. 대표적인 양전자방출핵종은 ^{18}F, ^{11}C 등이 있으며 주로 PET/CT (Positron Emission Tomography/Computerization Tomography) 스캐닝에 사용 된다. 감마선 핵종은 ^{123}I, ^{203}Tl, ^{67}Ga 등이 있는데 주로 SPECT (Single Photon Computerization Tomography) 등에 의한 스캐닝에 사용되며 감마 핵종 생산용 가속기의 에너지는 20 MeV 이상이어야 한다.

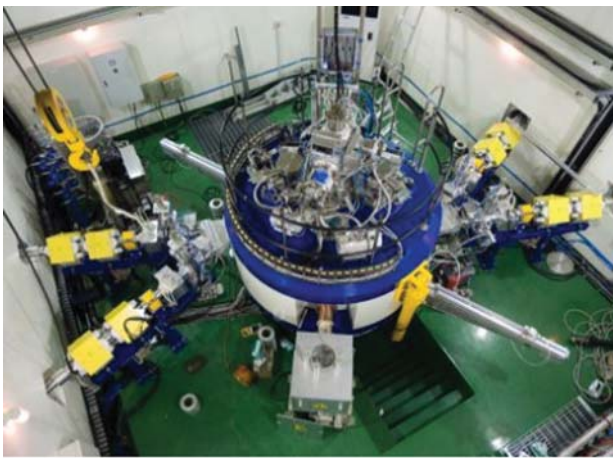

Fig. 11. KIRAMS-30 cyclotron at KAERI (Courtesy of KAERI).

Table 3. List of commercial cyclotron companies

Manufacturer	Nation
GE Healthcare	Sweden
Siemens Medical Systems	USA
Ion Beam Applications SA	Belgium
Advanced Cyclotron Systems	Canada
Sumitomo Heavy Industries	Japan
Samyoung Unitech Co.	Korea
Thales GERAC	France
AccSys Technology, Inc.	USA

Fig. 12. Accelerator mass spectrometry by NEC (Courtesy of NEC, USA).

Fig. 13. D-T accelerator (Courtesy of Thermo Scientific).

현재 양전자 방출 핵종은 주로 PET 진단 등 의료적으로 이용되고 있으나 두께측정이나 물질의 습도 측정과 분석용 추적자로 이용되기도 한다.

6. 이온빔 분석용 가속기

이온빔 분석용 가속기는 산업현장에서 발생되는 오염이나 환경 감시를 하거나 지질 및 해양 분석은 물론 의생명과학과 에너지 재생 등의 물질 분석에도 이용되는 전반적인 산업과 과학기술용으로 사용되는 범용 형태의 가속기이다.

이온빔 분석용 가속기로 수행할 수 있는 분석의 범위는 아래와 같다.

Rutherford Back Scattering (RBS)
Elastic Recoil Detection Analysis (ERDA)
Particle Induced X-ray Emission (PIXE)
Particle Induced Gamma ray Emission (PIGE)
Nuclear Reaction Analysis (NRA)
Charged Particle Activation Analysis (CPAA)
Accelerator Mass Spectrometry (AMS)

이온 빔 분석용 가속기는 수 100 keV에서 수 MeV의 에너지를 갖는 정전형 가속기가 대표적인 형태이다.

생산 판매 업체로는 네덜란드의 HVEE와 미국의 National Electrostatic Corporation이 대표적이며 일본의 Kobe Steel, Ltd에서도 생산 판매한다.

8. 중성자 발생용 가속기

중성자의 발생은 크게 MeV급의 대형 가속기와 (d,t) 반응이나 (d,d) 반응을 통하여 중성자를 발생 시키는 밀봉 튜브형이 있다. 중성자 발생용의 주종은 밀봉 튜브형이며 주요 생산 업체는 Thermo Scientific (USA), Adelphi Technology, Inc (USA), EADS Sodern (France)와 All-Russia Research Institute of Automatics-VNIIA (Russia)가 있다. 또한 가속기 형태의 중성자 발생 장치 공급회사로는 양성자와 중양자를 가속시킬 수 있는 선형 가속기업체인 AccSys Technology, Inc.와 IBA; Dynamitron, Sumitomo Heavy Industries;cyclotron, 및 NEC and HVEE; electrostatic accelerator 등이 있다.

Fig. 14. Pohang light source (Courtesy of PAL).

9. 방사광 가속기

방사광 가속기에서 발생하는 X선은 파장이 매우 짧고 세기가 강한 coherent 성의 광원이다. 이러한 광원은 초

고진공 상태에서만 가능하여 선진 각국들이 산업뿐만 아니라 과학기술용으로 앞다퉈 건설하고 있다. 산업용으로 사용되고 있는 방사광 시설은 수백 MeV에서 1.5 GeV 정도의 전자빔을 가속하는 것으로 상대적으로 에너지가 높지 않은 가속기를 이용한다. 산업용방사광 가속기는 주로 반도체 분야의 표면 개질, 리토그래피 (Lithography) 등에 이용하고 다양한 물질에 관련 된 화학 분야와 단백질 구조 분석이나 분자 영상을 위한 생명과학 분야에 이용이 활발하다.

현재 상업용으로 방사광 가속기를 판매하고 있는 회사로는 Oxford Instruments Accelerator Technology Group (UK)이 있으며 이 회사에서는 초전도 장치를 이용한 반도체 리토그래피 (Semiconductor Lithography)에 주력을 두고 있다. 또한 덴마크의 Danfysik과 일본의 Sumitomo Heavy Industries가 생산 판매하고 있다.

결 론

최근 방사선의 의료 및 산업 이용의 확대에 따라 원자로와 밀봉 선원을 이용한 방사선의 활용이 중소에너지의 입자 가속기의 저가 보급으로 고도화된 입자 가속기의 개발 및 생산이 증대 되고 있다. 특히 공항이나 항만 등에 필요한 대규모 검색 장비의 필요성이 인식 되어 MeV급 전자선에 의한 X-선 검색용 전자가속기와 핵의학용 방사성 동위원소를 생산하는 사이클로트론 등의 생산 산업시설이 구축되어 전 세계에 보급되고 있다. 현재 매년 가속기 산업은 10% 이상의 성장률을 보이고 있어 매우 전도유망한 종목의 산업이 될 수 있다. 본 논문에서는 방사선원으로 이용되고 있는 가속기의 이용분야와 가속기의 종류를 기술하고 가속기 산업을 주도하고 있는 산업체의 경향과 향후에 예상되는 산업용 가속기의 형태와 이용 전망에 대하여 기술하였다. 또한 차세대의 기술로 개발되고 있는 자유전자 레이저와 초전도 선형 가속기 및 사이클로트론 그리고 FFAG (Fixed Field Alternating Gradient) 가속기 기술이 실용화 개발되고 있어 전 세계 가속기 시장은 더욱 선택의 폭이 넓어지고 시장의 확대가 조속히 실현될 것이다.

참 고 문 헌

Alvarez LW. 1946. The Design of a Proton Linear Accelerator. *Phys. Rev.* **70**:799.

Blewett MH. 1977. Theoretical Aspects of the Behaviour of Beams in Accelerators and Storage Rings. CERN 77-13. pp. 111-138.

Breit G, Dahl O, Hafstad lR and Tuve MA. 1928. On Tesla-coil high voltage devices. *Nature* **121**:535.

Bryant PJ and Johnsen K. 1993. The Principle of Circular Accelerators and Storage Rings, Cambridge University Press.

Chai JS. 2007. Development of 13 MeV Cyclotron, Proceedings of Cyclotrons and their applications 2007. *World Scientific*.

Chao A. 1993. Physics of Collective Beam Instabilities in High Energy Accelerators, John Wiley, New York.

Cockcroft JD and Walton ETS. 1932. Experiments with High Velocity Ions. *Proc. Roy. Soc.* A136, 619. A137. 229. A144. 704.

Graaff RJ and Van de. 1931. First of a series of papers on electrostatic high voltage generators. *Phys. Rev*. **38**:1919A.

Hamm RW. 2010. Review of Industrial Accelerators and Their Applications CARRI 2010 ForthWorth.

IAEA. Food processing by irradiation. World facts and trends. IAEA News Features, December 1988, No.5, pp. 1-12.

IAEA Bulletin 2/1987. Radioisotopes and Radiation Technology in Industry; pp. 25-27.

Kerst DW. 1940. Acceleration of Electrons by Magnetic Induction. *Phys. Rev.* **58**:841.

Kerst DW. 1941. Induction electron accelerator. *Phys. Rev.* **59**: 110.

Kerst DW. 1941. The Acceleration of Electrons by Magnetic Inductions. *Phys. Rev.* **60**:53.

Kerst DW. 1942. 20 MeV Betatron or Induction Accelerator. *J. Sci. Instr.* **13**:387-394.

Kerst DW. 1942. Magnetic induction accelerator. *US-patent* No. 2,297,305.

Kerst DW and Serber R. 1941. Electronic Orbits in the Induction Accelerator. *Phys. Rev.* **60**:53.

Lawrence EO and Livingstone MS. 1931. First cyclotron in operation; 80 keV, 13 cm, *Phys. Rev.* **37**:1707.

Loes GA. 1983. Elementary Principles of linear Accelerators. SLAC PUB 3221. Also in AIP Conf. Proc. No. 105.

McMillan EM. 1945. The Synchrotron-A proposed High Energy Particle Accelerator. *Phys. Rev.* **68**:143-144.

Picraux ST. 1984. Physics Today, November. pp. 38-44.

Scharf, W. 1989. Particle Accelerators-Applications in Technology and Research, Research Series Press.

Slepian J. 1927. X-ray Tube, *US-Patent*. No. 1,645,304.

Universities Research Association. To the Heart of Matter -The Superconducting Super Collider. January, 1989.

U.S. Department of State. Terrorist attacks on U.S. business abroad. March 1989.

Van der Graaf RJ. 1931. A 1,500,000 Volt Electrostatic Generator. *Phys. Rev.* **38**:1919-1920.

Walton ETS. 1929. *Proc. Cambr. Phil. Soc.* **25**:469-481.
Wideroe R. 1928. Uber ein neues Prinzip zur Herstellung hoher Spannungen. *Arch. f. Electrot.* **21**:387-406.
Wideroe R. 1943. Der Strahlentransformator. *Arch. f. Elektrot.* **37**:542-555.
http://www.lightsources.org.

Manuscript Received: October 5, 2011
Revised: March 5, 2012
Revision Accepted: March 10, 2012