

# 중이온 선형가속기

오병훈  
한국원자력연구원

## 1. 서 론

최근 우리나라에서 초대형 중이온가속기 RAON의 건설이 본격화되면서 중이온가속기와 중이온 빔 활용에 대한 관심이 높아지고 있다. 본 지면에서는 중이온선형가속기의 일반적인 특성과 구조를 물리 전공자 외에도 이해할 수 있게 정리하려고 노력하였고, 또한 현재 한국원자력연구원에서 중형급 선형가속기 DIAC(Daejeon Ion Accelerator Complex)을 중심으로 구축하고 있는 이온빔 조사시험시설에 대한 소개와 활용 방향 등에 대해 설명하였다.

## 2. 중이온가속기<sup>(1)</sup> 종류

어떤 입자를, 어느 정도의 에너지까지 가속시켜서, 어떤 목적으로 사용할 것인가에 따라 다양한 종류의 가속기들이 만들어질 수 있다. 중이온가속기는 이온들 중에서도 특히 무거운 이온들을 가속시키기 위한 가속기들을 모두 대표하는 이름으로, 중이온을 가속하는 원리에 따라 직류가속기, 사이클로트론, 선형가속기, 싱크로트론 등으로 분류할 수 있다.

직류가속기는 단순하게 직류전원을 사용해서 중이온을 바로 가속시키는 방식으로, 가속하려는 이온을 음이온으로 만들어 1단 가속한 후 양이온으로 만들어 역방향으로 2단 가속을 시켜주는 탄뎀 방식이 주로 적용되지만, 가속 에너지와 가속 가능한 이온 종류가 다양하지 않기 때문에 그 활용이 매우 제한적이다. 사이클로트론은 고주파를 이용하여 상대적으로 작은 공간에 중이온을 가두고 회전시키면서 큰 에너지까지 가속할 수 있다는 장점이 있지만 가속할 수 있는 중이온들의 종류가 가속기 설계특성에 의해 제한된다. 선형가속기는 점점 빨라지는 이온들의 속도

를 고려해서 전극들이 직선으로 배열된 고주파 가속관을 이용하여 중이온을 가속시키는 원리로 에너지와 장치의 길이가 비례해서 커진다는 단점이 있지만 다양한 이온들을 모두 가속시킬 수 있다는 장점이 있다. 싱크로트론은 선형가속기와 달리 일정한 반경의 빔 라인 내에서 이온들이 회전할 수 있도록 하고 제어된 고주파에 의해 일정 간격에서 이온들을 가속시키는 원리로 장치가 목표하는 빔 종류, 가속에너지 등에 따라 다른 종류의 중이온가속기와 상호 보완적일 수 있다.

특히 고주파를 이용한 선형가속기에서 주파수가 높아지면서 커지는 고주파 캐비티에서의 저항에 의한 열은 가속 가능한 입자 에너지의 한계를 만들어내는데, 초전도 재료를 사용하면서 이 한계를 극복해나가고 있다.

## 3. 중이온가속기의 특징

무거운 입자인 중이온을 가속시키기 위해서는 전자나 양성자를 가속시키는 힘보다 훨씬 더 큰 힘이 필요하기 때문에 중이온가속기는 다른 가속기들에 비해 늦게 발달하였다. 중이온가속기 기술을 획기적으로 개선시킨 것은 ECR (Electron Cyclotron Resonance) 이온원의 등장이다.

가속기의 이온원은 가속기에서 가속할 이온을 만들어서 공급해주는 장치로 대부분의 이온원은 1개의 이온을 중점적으로 만들어서 가속기 등에 공급하지만, ECR 이온원은 높은 에너지의 전자들을 이용하여 여러 개의 전자들을 원자의 정상 전자 궤도에서 떼어냄으로써 다가의 이온들을 효과적으로 많이 만들어낼 수 있으며, 이들 중에 특정한 다가 이온들을 선택적으로 인출하여 가속기에 공급할 수 있다. 다가 이온은 일반적으로 존재하는 전자 하나가

원자에서 분리된 일가이온보다 동일한 전압에서 다가 수만배의 더 큰 힘으로 이온을 가속할 수 있기 때문에, 무거운 입자이지만 효과적으로 가속시킬 수 있게 된다. 따라서 특히 높은 성능의 중이온가속기에서 ECR 이온원의 성능은 중이온가속기의 성능과 직결된다는 특징을 갖고 있다.

### 3. 중이온 선형가속기 DIAC

ECR 이온원을 제외하고 중이온가속기는 다른 가속기들의 원리와 구성 등이 동일하다. 여기서는 현재 한국원자력연구원에서 중이온빔 조사시험시설을 위해 구축중인 중이온 선형가속기 DIAC을 중심으로 설명할 것이다. 선형가속기 DIAC은 그림 1과 같이 ECR 이온원, RFQ(Radio Frequency Quadrupole) 전단가속기, 4단의 IH Linac (Inter Digital Linear Accelerator) 선형가속기들을 중심으로 구성되어 있다.

#### (가) ECR 이온원<sup>[2]</sup>

중이온가속기에서 가속효율을 높이기 위해서는 ECR 이온원이 필수적이다. ECR 이온원에서 다가 이온을 만드는 원리(그림 2 참조)는 강한 자장을 이용하여 전자들과 이온들을 일정 용기에 가두고, 자장 속에서의 전자들의 공명현상을 이용하여 전자들의 에너지를 충분히 높인 후, 높아진 에너지의 전자들에 의해 원자 외곽전자들을 가능한 많이 원자궤도로부터 떼어내서 가속기에서 필요한 충분한 양의 다가이온을 만드는 것이다. 최근 우라늄 등 더 무거운 원소들을 높

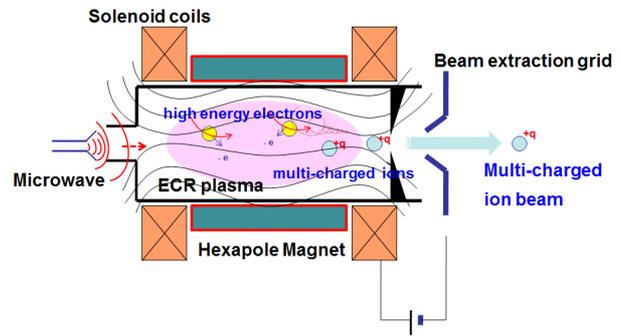


그림 2. 다가이온을 만들기 위한 ECR 이온원의 원리.

은 에너지까지 가속하기 위해 20 GHz 이상의 고주파와 초전도자석을 사용한 ECR 이온원의 개발과 또 개발된 초전도 ECR 이온원의 성능개선 등을 위한 연구들이 중이온가속기 개발과 함께 진행되고 있다. DIAC에서는 18 GHz ECR 이온원 과 14.5 GHz ECR 이온원 두 대를 사용하여 각각 금속이온과 기체형 이온들을 다가이온 빔 형태로 만들게 된다.

#### (나) RFQ 전단가속기

큰 에너지까지 입자를 가속해야하는 선형가속기에서 낮은 에너지에서의 가속효율을 공간적으로 높이기 위해 전단가속기를 따로 사용하는 것이 일반적이다. RFQ도 선형가속기의 일종으로, 90도 간격으로 길게 정렬된 4중극 구조의 고주파 캐비티로 이온빔이 이 속을 진행하면서 가속되는 입자들을 진행방향으로 그룹화 하는 역할을 포함하여 빔을 집속하고, 빔을 가속하는 기능들이 동시에 이루어진다. DIAC의 RFQ는 4중극 전극의 길이가 약 8.6m로 25.96 MHz 고주파를 사용하고, 이온원으로부터 전달받은 핵자당 2.1 keV 에너지의 특정 다가이온들을 178 keV 까지 가속시킬 수 있다.

#### (다) IH Linac

IH Linac 선형가속기는 빔 방향으로 직선으로 정렬된 원통형 고주파 전극들로 이루어지는데, 전극들의 길이는 입자들의 속도와 고주파 주파수와 연관되어 있어서 가속된 입자가 전위가 0인 전극 통속을 통과할 때는 힘을 받지 않고 지나가지만, 전극 통속을 지나가는 동안 극성이 바뀐 그 다음 전극에 의해 가속됨으로써, 연속된 전극 사이에서 꾸준히

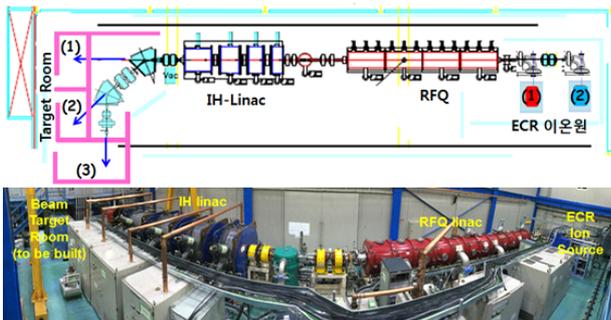


그림 1. DIAC 중이온가속기 빔라인 구성도 및 구축 사진.

가속되도록 하는 원리로 구성되어 있다. 특히 중이온가속기에서는 가속입자의 질량(M)과 가속입자의 하전수(q; ECR 이온원에서 다가화 된 수)의 비(M/q)가 중요한 가속 파라메타 중 하나인데, 이 비가 크면 주파수에 맞는 입자속도를 만들기 위해 더 큰 전압을 전극사이에 인가해 주어야하기 때문에, 고주파전원의 피크전압 한계, 즉 고주파전원의 출력이 중이온가속기 성능의 또 다른 파라메타가 된다.

DIAC의 IH Linac은 4단의 선형가속기 모듈로 구성되어 있으며, 각 모듈 내부에는 8개의 원통형 가속전극이 정렬되어 있고, 각 모듈 사이는 고주파 위상에 차이를 두고 제어함으로써 최종적으로 입자 당 최대 1 MeV 에너지의 중이온 빔을 얻어낼 수 있다. 4 단을 합쳐서 총 5.6m의 길이로 각 단의 길이는 높은 에너지로 갈수록 길어지는 구조를 가지며, 51.92 MHz 주파수를 사용하고, RFQ에서 선행 가속된 중이온 빔의 M/q 값에 따라서 고주파 전원의 peak-to-peak 전압을 제어하면서 최종 빔의 에너지를 제어할 수 있다.

(라) DIAC 제원 및 빔 스펙

가속기의 성능은 빔 에너지와 전류에 의해 대표되는 데, 중이온가속기의 경우에는 가속 가능한 이온들의 종류가 추가되어야 가속기의 성능이 정확히 정의될 수 있다. DIAC 중이온가속기는 초전도 캐비티를 사용하지 않기 때문에 가속 가능한 빔 에너지에서 한계가 있지만, 이론적으로는 양성자를 제외한 모든 이온들을 M/q가 9 이하인 다가이온으로 만들어 가속시킬 수 있고, 실질적으로 ECR 이온원의 성능과 가속된 이온 빔 전류 값의 유용성 등을 감안하여 다음과 같은 제원으로 정의될 수 있다.

- 가속 이온 He 부터 Xe 사이 모든 이온
- 가속 에너지 최대 1 MeV/nucleon
- 가속 전류 빔출력 1 kW로 제한된 전류

#### 4. 중이온가속기 활용

중이온가속기에서 가속된 이온 빔은 가속된 에너지, 빔 전류, 이온 빔 종류에 따라서 다양한 분야에서 이용될 수 있다. 원자력연

구원에서 DIAC 중이온가속기를 중심으로 구축 중에 있는 중이온빔 조사시험시설에는 그림 1에 보인 것처럼 재료조사시험실, 수직빔 조사시험실, 마이크로빔 조사시험실 등 3개의 조사시험실이 구성될 예정이다. 재료조사시험시설에서는 핵융합 및 신행원자로 재료들의 중성자 손상시험을 중심으로 재료소재 관련 시험들이 다양한 원소들을 가속하여 이루어질 계획이고, 수직빔 조사시험시설에서는 시료가 수평으로 유지되어야 하는 생물학 관련 시험들을 중심으로 이루어질 것이다. 마이크로빔 조사시험시설에는 고집속 마이크로빔을 만들어 정밀 제어할 수 있는 시스템을 구성하여 신물질 개발, 마이크로빔 활용, 나노물질 개발 등을 수행할 수 있는 연구기반을 만들어 관련 연구들을 주도적으로 수행할 계획이다.

원자력연구원에 중이온빔 조사시험시설이 완성되면 외부 연구자들에게도 개방하여 국내에서도 중이온 빔을 활용한 다양한 연구들이 활발하게 수행될 수 있도록 유도해 나갈 것이다.

#### 참고문헌

- [1] Eighth International Conference, "Heavy Ion Accelerator Technology", AIP Conference Proceedings 473, Argonne Illinois (1998)
- [2] Bernhard Wolf et al., "Handbook of Ion Sources", CRC Press (1995)

#### 저자이력

오 병훈(吳秉勳)

1978-1982년 한양대학교 원자력공학과, 1982-1984년 한양대학교 원자력공학과 석사, 1985-1993년 한양대학교 원자력공학과 핵융합공학박사, 1995-1996년, 일본 원자력연구소 핵융합연구부 (방문연구원), 1997-1998년, 캐나다 Saskatchewan 대학 물리학과 (Post Doc.), 현재 한국원자력연구소 책임연구원

