

## 가속기의 현황과 전망

강 흥 식  
포항가속기연구소

### 1. 서 론

20세기 초반 소립자물리학의 태동기에 새로운 입자의 발견은 주로 외계로부터 날아오는 우주선입자(cosmic ray)를 통해 이뤄졌다. 우주선입자로부터 새로운 입자가 발견되는 것이 한계에 달할 즈음 입자가속기가 발명되면서 계속 새로운 입자가 그 존재를 드러냈다. 가속기를 이용한 기본입자(전자, 전자중성미자, 뮤온, 뮤온중성미자, 타우, 타우 중성미자, 쿼크6개: 업(u)-다운(d), 참(c)-strange, 톱(t)-바텀(b))의 발견은 약 1백여년전인 1897년 톱슨의 전자발견으로부터 시작한다. 톱슨의 실험장치인 음극선관은 가장 간단한 입자가속기이므로 입자가속기에 의해 첫 번째로 발견된 것은 전자라고 할 수 있다. 타우 입자는 미국 스탠퍼드선형가속기(SLAC)에서 전자-양전자 충돌가속기 실험을 통해서 발견됐다. 그리고 뮤온중성미자는 미국 브룩헤이븐의 입자가속기 실험을 통해서 발견되었다. 또한 지난 1995년에 미국 페르미 국립가속기연구소의 테바트론 가속기에서 톱 쿼크가 발견됨으로써 6개의 쿼크가 모두 발견되게 되었다. 이처럼 입자가속기는 자연계의 기본질서를 발견하고, 그들 사이의 상호 작용에 대한 이론을 정밀히 검증하며, 대칭성 깨짐 현상을 발견하는 등 수없이 많은 일을 이루어 냈다.

소립자연구를 목적으로 시작된 가속기연구는 그 분야를 과학 전반으로 확대하여 왔다. 입자가속기에서 입자의 에너지가 증가함에 따라 싱크로트론 방사선(방사광)으로 입자의 에너지가 에너지의 4승에 비례하여 크게 손실되어, 방사광은 입자의 에너지를 증가시키는데 있어서 큰 골칫거리가 불과하였으나 방출되는 방사선 특히 엑스선이 물질에 대한 탐구에 없어서는 안 될 탐침(probe)으로서 그 중요성이 부각되면서 방사광만을 목적으로 하는 가속기의 건설이 80년대부터 본격적으로 추진되었다. 방사광가속기란 광속과 거의 같은

속도로 가속된 전자빔이 진로(또는 방향)를 바꿀 때 그 커브의 접선방향으로 좁은 퍼짐을 가지고 방출되는 매우 강력한 빛을 만들어 내는 장치이다. 당시까지는 상상도 못하던 이 밝은 빛은 새로운 생산기술 및 신소재의 개발, 재료공학, 화학공학, 의학, 제약공학 등과 같은 응용과학으로부터 물성론, 원자분자물리, 화학, 생물학에 이르는 기초과학까지 실로 다양한 연구분야에 폭넓게 이용되고 있다. 이 방사광의 사용범위는 해가 갈수록 급속히 늘어나는 추세에 있다. 사용자시설로 운전 중이거나 건설 중인 방사광가속기는 미주에 14개 (ALS, APS, CLS 등), 유럽에 22개 (SLS, ESRF, ELETTRA 등), 아시아에 25개(PLS, Spring-8, NSRRC 등)나 된다. [1]

소립자연구에서 시작된 가속기연구가 이제는 방사광가속기로 그 무게 중심이 옮겨간 상태이다. 최근에는 중성자(neutron)가 새로운 탐침으로 부각되면서 중성자원(neutron source)을 만들 수 있는 대출력 양성자가속기에 대한 관심이 높아지고 있다. 소립자연구와 관련하여 쿼크와 경입자, 그리고 게이지 보존들이 질량을 가질 수 있는 근거가 되는 힉스 입자가 아직 발견되지 않고 있는 데, 이를 위해 새로운 가속기인 LHC(Large Hadron Collider)가 유럽에서 건설되고 있으며, 전자-양전자 선형 충돌기(linear collider)의 건설을 위해서 국제적인 공동연구가 진행 중에 있는데 예상되는 가속기의 길이가 30 km에 이르는 초거대가속기가 될 전망이다 (ILC: (International Linear Collider)). [2]

거대가속기의 원리도 최초의 가속기인 음극선관에서 크게 다를 바 없는데, TV 브라운관이 음극선관과 동일한 구조이고 보면 입자가속기는 우리의 생활 속에 가까이 존재하고 있는 것이다. 이렇게 규모가 커지고, 현대과학에서 핵심적인 역할을 담당하고 있는 가속기의 원리와 종류, 그리고 현황 및 전망에 관하여 기술하고자 한다.

## 2. 가속기의 종류

가속기는 입자에너지가 수십 KeV (KeV:  $10^3$  eV)의 아주 작은 규모에서 수 TeV (TeV:  $10^{12}$  eV) 에너지의 거대 입자가속기까지 그 규모가 매우 다양하다. 1 eV는 전하량이 +e인 입자가 전압 1 V가 걸린 전극에서 얻을 수 있는 에너지이다.

가속기를 입자의 종류에 따라서 전자가속기와 이온가속기로 분류할 수 있는데, 이온가속기의 대표적인 예가 양성자(proton: 수소 원자핵)가속기이고, 그 외 양성자보다 무거운 중이온가속기(탄소이온 등)가 있다. 전자는 정지질량이 0.511 MeV인 가장 가벼운 입자로서 에너지가 수 MeV 이상으로 가속되면 속도가 광속에 가까운 상대론적 범이 된다. 한편 양성자(proton)는 정지질량이 938 MeV로서 전자질량의 약 1800배에 달하는 무거운 입자이며 무거운 만큼 1 GeV로 가속되어도 속도는 광속의 0.87에 불과하다.

양성자 가속기는 1 GeV 에너지까지 가속되면 수 MW에 이르는 매우 높은 빔출력을 만들 수 있고, 핵파쇄 중성자원 등의 연구에 활용될 수 있다. 핵파쇄 중성자원은 중성자를 생성하여 방사광가속기에서 생성되는 엑스선이 할 수 없는 물질 탐구에 활용된다. 엑스선은 원자의 전자와 반응하나 중성자는 원자핵과 반응하므로 엑스선이 측정할 수 없는 수소원자가 많은 재료의 연구 등에 활용된다. 다음세대의 탐침(probe)으로 중성자가 각광받고 있는 이유가 여기에 있다. 미국에서 건설 중인 SNS(Spallation Neutron Source)가 그 예인데 에너지가 1GeV이고, 양성자빔 출력이 4MW나 된다[3]. 일본도 비슷한 가속기를 건설 중인데(J-Parc) 에너지가 3GeV 이고, 양성자빔 출력이 2MW나 된다.

가속기는 그 모양으로 선형가속기와 원형가속기로 구분될 수 있다. 원형가속기의 예로서 싱크로트론(synchrotron), 싸이클로트론(cyclotron), 마이크로트론(microtron), 저장링(storage ring) 등이 있다. 선형가속기로는 인덕션 리낙, 고주파 리낙(RF linac) 등이 있다.

가속기를 용도로 분류하면 산업용가속기, 방사광가속기, 의료용가속기, 소립자연구용가속기 등이 있다. 산업용가속기로는 이온주입

기(ion implanter), 전자빔조사기, 전자빔 용접기 등이 있고, 암치료 등에 사용되는 의료용가속기는 그 활용범위가 가장 광범위하다.

가속기는 입자를 가속시키는 전기장의 형태에 따라서 DC와 고주파(주파수가 수 MHz 이상)로 분류할 수 있다. 고주파는 전기장이 사인파형태로 시간에 따라 변하는 경우이고, 그렇지 않은 경우를 모두 DC로 분류한다. 따라서 사인파형태의 진동이 없는 펄스 형태의 전기장도 DC로 분류된다. DC형 가속기로는 고전압 터미널에 전하를 쌓아서 높은 전압을 유지하여 입자를 가속시키는 반데그라프(Van de Graff), 펠리트론(Pelletron), Cockcroft-Walton 등이 있고, 펄스트랜스포머의 원리를 이용한 인덕션리낙(induction linac)도 이에 해당한다. 고주파형 가속기는 원통(또는 구) 모양의 도체인 공동(cavity)에 전자기파를 저장하여 입자를 가속시키는 방법이다.

고전압터미널에 전하를 축적하여 전압을 높이는 DC 방법은 고전압터미널에서 발생하는 대기의 절연파괴(breakdown) 현상 때문에 전압을 높이는데 한계가 있다. 절연강도를 높이는 다양한 방법이 도입되어 전압이 수 MV 까지 도달한 가속기도 있으나, 고전압터미널의 전압이 입자의 에너지와 같으므로 요구되는 절연강도가 비례해서 커져야하기 때문에 DC형 가속기로 입자를 수 MeV 이상으로 가속시키는 것은 불가능하다.

반면 고주파형 가속기는 원리상 공동에 저장되는 전기장이 입자의 에너지와 상관이 없고, 공동의 외벽은 접지에 연결되어 있기 때문에 아무리 입자의 에너지가 높아져도 DC형태에서 나타나는 대기의 절연파괴 문제는 없다.

## 3. 고주파 가속기의 입자 가속 원리

전자는 백열전등에 사용되는 필라멘트처럼 금속이 높은 열로 가열되면 표면에서 방출되는데, 음극에서 최초로 방출될 때 전자가 갖는 운동에너지는 0.1 eV 정도로 이렇게 작은 운동에너지의 전자를 수 GeV 또는 수 TeV 운동에너지로 가속시키기 위해서 필요한 것이 가속기이다.

질량을 가지고 있는 모든 물체는 서로 잡아당기는 힘이 있다. 이 힘이 바로 뉴턴이 찾아낸 만유인력이다. 전기를 띤 입자(하전 입자) 역시 상호간에 힘이 작용한다. 그러나 이 힘은 만유인력과 달리 서로 다른 부호를 가진 하전입자 사이에서는 끌어당기는 힘으로, 같은 부호를 가진 하전입자끼리는 서로 밀어내는 힘으로 작용한다. 하전입자간에 작용하는 이 힘을 쿨롱의 힘이라고 한다.

따라서 전자와 같이 음전기를 띤 입자는 양극으로, 양성자와 같이 양전기를 띤 입자는 음극으로 끌려가게 되는 것이다. 끌려간다는 것은 힘이 작용하고 있음을 나타내며, 힘이 작용한다는 것은 질량을 가진 물체가 가속되고 있음을 뜻한다. 즉, 가속장치의 원리는 이러한 성질을 이용한 것이다. 예를 들어 그림 1에서 보는 바와 같이 전자가 1.5 볼트 건전지와 연결된 두 금속판 사이를 지나간다고 한다면, 전자는 음극에서 반발하고 양극으로 끌려가게 된다. 이와 같이 약간의 가속에너지를 전자에 가하면 전자의 에너지는 1.5 일렉트론 볼트(eV)만큼 증가하게 되는 것이다. 따라서 이와 같은 가속을 무수히 반복하게 되면 전자는 높은 에너지를 얻게 되는 것이다.

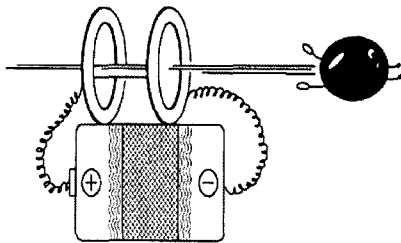


그림 1. 입자의 가속 원리

포항방사광가속기에 있는 선형가속기는 전자를 25억 전자볼트 (2.5 GeV)까지 가속시킬 수 있는데 가속기의 길이는 150 m에 불과하다. 25억 전자볼트는 1.5V 건전지 17억 개를 직렬로 연결한 것과 같은데, 만일 건전지를 사용한다면 (DC 형태이기 때문에 실제로는 불가능하지만) 전체길이가 약 75 km (건전지 하나의 길이 4.5 cm x 17억)나 된다.

선형가속기에서 매우 짧은 길이로도 입자를 높은 에너지로 가속시킬 수 있는 원리는 마

이크로웨이브에 있다 (마이크로웨이브는 고주파의 한 부분으로 주파수가 1 - 수십 GHz 임). 입자가 선형가속기에서 에너지를 얻기 위해서는 에너지를 전달해 주는 매개체가 있어야 하는 데, 마이크로웨이브가 가장 효율적으로 그 역할을 담당한다. 마이크로웨이브를 포함하여 모두 전자기파는 에너지 흐름이고, 많은 양의 에너지를 저장하고 그리고 효율적으로 그 에너지를 입자에 전달할 수 있으면 된다.

고주파는 시간에 따라 전압의 부호가 바뀌므로 하전입자가 가속되는 순간과 감속되는 순간이 한 주기에 한번씩 주기적으로 나타난다. 따라서 가속되는 순간에 가속될 하전입자가 놓이게 하고 감속되는 순간은 적절히 피해간다면, 계속 가속되는 순간에만 하전입자가 가속되므로 높은 에너지로 가속시킬 수 있는 것이다. 이것은 파도타기 선수가 파도에 밀려 가속되는 이치와 마찬가지로 하전입자를 고주파의 파도에 실어 가속시키는 것이다. 그러나 원통구조만으로 이루어진 원통형 도파관자체의 문제점은 도파관을 지나는 위상속도가 광속보다 빠르기 때문에 하전입자가 가속되어야 할 고주파의 가속지점을 제대로 따라가면서 가속될 수 없다는데 있다. 따라서 고주파의 위상속도를 강제로 늦추도록 원통내에 원판을 끼운 형태를 하고 있다.

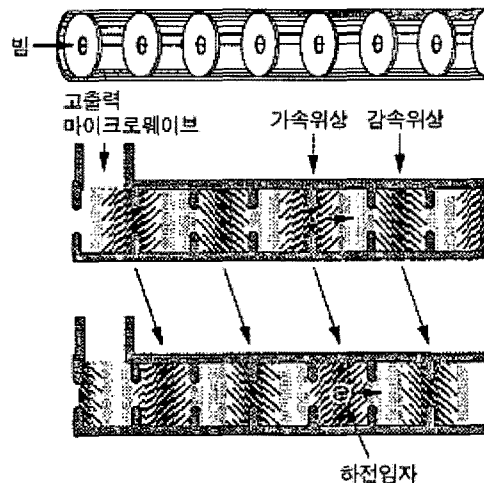


그림 2. 고주파의 입자 가속원리

최근 통신에 널리 이용되는 마이크로웨이브는 1950년대에 이미 가속기기술로 활발히 연구되었다. 마이크로웨이브가 많은 양의 에

너지를 담아내기 위해서는 금속도체관안에 가두어 두어야 한다. 통신에 사용되는 마이크로웨이브는 대기 중에 방사 되므로 에너지를 크게 높일 수 없지만, 도체관안에 가두면 수 MW에서 수십 MW로 높일 수 있다. 마이크로웨이브를 가두는 금속도체관은 전자를 가속시키기에 적당하게, 즉 에너지를 전달하기에 적당하게 특별한 구조로 만들어지는데, 이것이 고주파공동(RF cavity)이다. 고주파공동은 보통 구리로 원통모양으로 만들고 그 안으로 마이크로웨이브가 진행하게 되거나 (travelling wave cavity), 진행하지 않고 가두어진 상태 (standing wave cavity)로 공진되는 데, 마이크로웨이브의 전기장 성분이 전자의 진행 방향과 평행하게 생기도록 하는 구조로 되어 있어, 전자가 마이크로웨이브의 전기장에서 에너지를 전달 받아 가속된다. 또 하나 중요한 점은 가속되면서 진행하는 전자와 마이크로웨이브의 시간 동기이다. 마이크로웨이브는 시간에 따라 사인 함수로 변하고, 침투에서 전기장이 즉 에너지가 최대가 되는데, 전자가 계속 침투 전기장을 만나면서 가속된다면 가속효율이 최대가 된다.

가속공동의 가속효율은 두가지 파라메타, 션트저항 (shunt impedance,  $R_{sh}$ )과 quality factor(Q)로 표현된다. [4]

$$Q = \frac{\omega U}{P}, \quad R_{sh} = \frac{V^2}{P}$$

$P$ 는 공동내벽에서 손실되는 고주파출력으로 고주파전류가 공동내벽의 표면에서 흐를 때 발생하는 저항손실(ohmic loss)이고,  $U$ 는 공동에 저장된 에너지,  $\omega$ 는 고주파 주파수,  $V$ 는 고주파공동에 유기되는 전압이다. 위 식은 고주파공동에 입자의 가속에 요구되는 전압  $V$ 가 유기되려면 고주파출력이  $P$ 만큼 소모되어야 한다는 의미를 갖는다. 가속효율이 높으려면  $P$ 를 작게 하면서 요구되는  $V$ 를 유지하여야 한다. 즉  $R_{sh}$ 와 quality factor가 커야만이 높은 가속효율을 얻을 수 있다. 공동 내벽에서 손실되는 고주파출력  $P$ 는 공동재료의 표면저항에 비례하므로 저항이 매우 작은 초전도공동이 상전도공동보다 훨씬 큰 quality factor를 줄 수 있다. 구리를 사용하는 상전도공동의  $Q$ 값은 사용하는 고주파 주파수에 따라 차이는 있지만 보통  $10^4$

정도이다. 한편 초전도 공동은  $10^8$  이상이기 때문에 그 차이는 실로 엄청난 것이다. 요구되는 고주파출력이  $10^4$ 배 이상 차이가 나므로, 공동내벽에서 손실되는 고주파가 무시될 정도로 작아 공동 1 개에 수 W 정도 밖에 안 된다. 한편 상전도공동은 공동 1개당  $P$ 가 수십 kW나 되는 데, 이렇게 발생된 열은 공동외벽에 부착된 냉각장치에 의해서 냉각된다. 따라서 경제적인 측면에서 볼 때 열로서 소모되는 고주파출력이 매우 작은 초전도공동이 큰 우위를 갖고 있다. 때문에 고주파공동의 길이가 장장 30 km에 달하는 ILC 가속기는 고주파공동으로 초전도공동을 사용할 예정이다.

#### 4. 가속기와 빛

모든 하전입자(전자, 양전자, 양성자)는 가속되면 전자기파를 방출한다. 발생하는 전자기파의 총량 ( $P$ )은

$$P = \frac{2}{3} \frac{e^2}{m_0^2 c^3} \left( \frac{dp}{dt} \cdot \frac{dp}{dt} \right)$$

이고, 여기서  $c$ 는 광속( $3 \times 10^8$  m/sec),  $m_0$ 은 하전입자의 질량, 하전입자의 운동량 (momentum)  $p = \gamma m_0 v$  이고,

$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}$ 는 로렌츠 인자(Lorentz factor)이다. 로렌츠 인자  $\gamma$ 는 저장링에서 운동하는 전자의 에너지를  $E$ 라 하면  $\gamma = 1 + E/m_0 c^2$  이다. 전자의 경우  $m_0 c^2$ 은 0.511MeV이다. 하전입자의 속도( $v$ )가 광속에 가까워질수록  $\gamma$ 는 매우 크게 된다 (2.5 GeV 전자빔:  $\gamma = 5000$ ). 발생하는 전자기파의 총량은 하전입자의 가속량 (시간당 운동량의 변화량) 즉  $\frac{dp}{dt}$ 가 클수록 크다.

선형가속기에서 하전입자는 진행 방향으로 운동량이 증가하는 데 그 변화량 (가속량)은 매우 작으므로 하전입자가 가속되어도 전자기파 발생량이 매우 작다. 그 이유는 전자를 예를 들면 전자는 에너지가 3 MeV 이상 되면 속도가 광속에 가깝게 되어 가속되면 속도  $v$ 에 변화가 없고  $\gamma$ 만 증가하는 데 그 변화량은 매우 작아서 전자기파 발생량은 미미하다. 2.5GeV 선형가속기는 약 100 m

이고 전자가 100 m를 진행하면서 가속되는데 걸리는 시간이 330ns ( $1 \text{ ns} = 10^{-9} \text{ sec}$ ) 이므로, 330ns 동안 운동량이 5000배 증가한 것에 불과하다. 이런 운동량 변화로 방출되는 전자기파는 매우 미미하다.

그러나 전자가 2극자석에서 진행방향이 바뀌는 경우는  $\gamma$ 는 변하지 않지만  $v$ 가 크게 바뀐다.  $v$ 는 벡터량으로서 진행방향이 바뀌면 그 변화량은 매우 크고 그 양은 진행방향의 각도 변화에 비례한다. 특히 운동량이 변하는 시간이 매우 짧다. 2극자석의 길이를 1 m로 가정하면 2극자석에서 진행하는데 걸리는 시간은 3ns 에 불과하다. 때

문에  $\frac{dp}{dt} = \gamma m \frac{dv}{dt}$  에서  $v = \frac{dv}{dt}$  가 커져서 큰 운동량의 변화로 전자기파를 발생하게 된다. 이 경우  $v = \frac{dv}{dt}$  는 구심가속력을 의미하고 선형가속기와는 달리 입자의 진행방향과 수직방향으로 가속력을 받은 경우이다. 이 경우는 입자의 에너지는 변화가 없는 것으로 보이지만 ( $\gamma$ 의 변화가 미미함) 실제로는 방출된 전자기파만큼 에너지가 줄어든다.

발생되는 전자기파는 발생지점으로부터의 각도에 따라 강도에 차이가 있다. 하전입자의 속도 ( $v$ )가 광속 ( $c = 3 \times 10^8 \text{ m/sec}$ ) 보다 아주 작은 경우에는 전자기파는 가속 ( $v = \frac{dv}{dt}$ ) 방향의 수직 방향에서 가장 강도가 크다. 하전입자의 속도 ( $v$ )가 광속에 가까워지면 강도가 큰 쪽이 하전입자의 진행 방향으로 근접하게 된다. 원형가속기의 경우는 하전입자의 진행방향으로 전자기파가 쏠려서 진행하게 되는데 매우 날카로운 지향성을 보인다.

### 5. 방사광가속기

방사광가속기는 전자빔을 수GeV 까지 가속시키는 전자선형가속기 (또는 booster)와 전자빔을 저장하는 저장링으로 구성된다. 저장링에서 전자빔이 2극자석과 직선구간에 설치된 삽입장치에서 궤도를 바꿀 때 발생하는 방사광(빛)을 이용한다. 소립자연구용가속기에 더부살이 했던 1세대방사광가속기, 그리

고 2극자석만을 사용했던 2세대 방사광가속기와 구분해서 삽입장치를 사용하는 방사광가속기를 3세대방사광가속기라고 한다. 대표적인 3세대방사광가속기가 표 1에 비교되어 있다.

포항방사광가속기(PLS: Pohang Light Source)는 1991년에 건설이 시작되어 1994년 12월에 건설이 완료되고, 1995년 9월부터 빔라인 이용자에게 2.0 GeV 빔으로 방사광을 최초로 제공하기 시작하였다. 과학계의 염원이던 우리나라 최초의 대형 방사광가속기가 성공적으로 완공된 후 정상적인 가동을 통해 많은 과학자들에게 사용기회를 제공하고 있다. 2005년에 이용자 지원을 시작한 지 만 10년이 지났고, 빔라인 이용자수도 연 1천여명, 실험과제수도 400여건으로 이용분야의 여러 인력이 모여서 각각의 연구실험을 수행할 수 있는 종합 연구시설의 성격을 띠게 되어 범국가적 공동이용 거대시설(national users' facility)로 확실히 자리매김하였다. 방사광가속기가 제공하는 매우 밝은 엑스선이 많은 이용자를 끌어들이 이유가 되겠지만, 무엇보다도 방사광가속기의 강점은 하나의 시설에서 20여가지의 (빔라인수와 동일) 서로 다른 실험을 동시에 수행할 수 있다는 것이다. 그만큼 방사광가속기는 그 활용도가 매우 높은 매력적인 시설임에 틀림없다.

표 1. 세계의 방사광 가속기

	에너지 (GeV)	전류 (mA)	
PLS	2.5	200	한국
ALS	1.9	400	미국
ESRF	6	100	EU
Spring-8	8	100	일본
APS	7	100	미국

우리나라가 15년 전에 건설을 시작한 이 3세대방사광가속기를 세계 각국이 지금도 독자적으로 확보할 목적으로 새로 건설하고 있거나 건설을 제안하고 있는 것을 보면 그 점에 대해서 의문의 여지가 없다. 현재 건설 중이거나 최근에 건설된 것으로 영국의 DIAMOND, 프랑스의 SOLEIL, 오스트레일리아의 BUMERANG, 캐나다의 CLS, 미국의 SPEAR-III, 중국의 Shanghai

Light Source, 그리고 건설을 제안하고 있는 것으로 스페인의 Spanish Synchrotron Light Source, 독일의 PETRA-III가 있다.

방사광가속기에서 빛을 만들어내는 방법은 전자(electron)와 같은 하전입자(charged particle)의 운동에너지의 일부를 빛의 에너지로 변환시키는 것이다. 높은 운동에너지를 갖고 있는 전자가 가속운동을 할 때, 구심가속도가 작용하여 진행방향이 휘는 경우, 운동에너지의 일부가 빛의 에너지로 변환되는데, 이때 매우 강한 빛이 방출된다. 전자의 진행 방향을 휘게 하는 방법으로 2극전자석을 사용하는 데, 전자의 진행방향에 위로 수직인 방향으로 자기장이 걸리면 전자는 진행방향의 수평 방향으로 휘게 된다(그림 3참조).

휘는 각도는 전자의 운동에너지와 전자석의 길이, 자기장의 세기에 따라 다르고, 방출되는 빛의 최대 에너지와 밝기도 여기서 결정된다. 방출되는 빛은 우리가 눈으로 감지할 수 있는 낮은 에너지의 가시광선에서 높은 에너지 영역인 엑스선까지 에너지 폭이 매우 넓다 (가시광선 - 자외선 - 연엑스선 - 경엑스선). 전자가 갖고 있는 운동에너지가 클수록 에너지가 큰 빛이 많이 나오고, 밝기도 크게 되는데, 경엑스선의 방사광을 뽑아내기 위해서는 전자의 운동에너지가 수십억 전자볼트는 되어야 한다 (그림 4 참조). [5]

그림 5처럼 수십억 전자볼트 에너지의 전자빔을 저장해 놓고 계속 빛을 뽑아낼 수 있도록 만든 것이 방사광가속기인데, 예를 들어 전자를 10도 꺾을 수 있는 2극전자석을 36개 설치하면 전자는 원형 궤도를 계속 돌

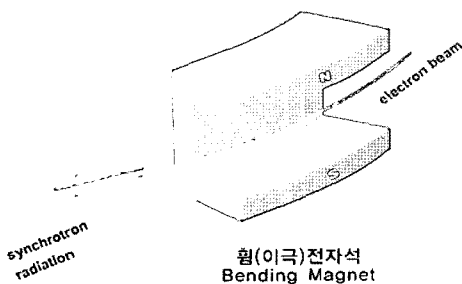


그림 3. 2극전자석에서 방사광의 발생

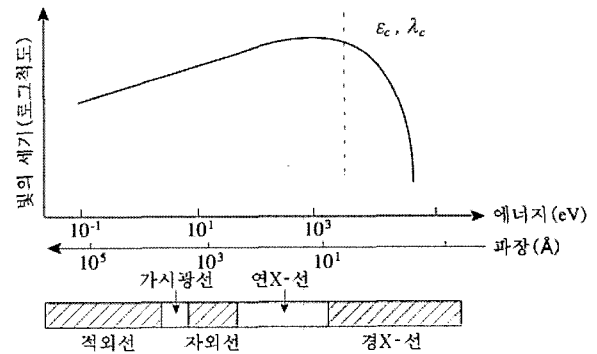


그림 4. 방사광 스펙트럼

게 되며 이것이 원형방사광가속기를 저장링이라고 부르는 이유이다. 포항방사광가속기는 저장링의 둘레 길이가 약 280m에 달한다.

광속에 가깝게 가속된(상대론적) 전자와 비교적 느린 전자(비상대론적)가 자기장 등의 영향으로 방향을 바꾸어 곡선궤도를 그럴 때 방출하는 빛은 그 퍼짐과 스펙트럼에 있어 큰 차이를 보인다. 즉 상대론적 속도의 전자는 특히 그 퍼짐이 좁고 단파장의 강한 빛을 방출한다는 것이 크게 다른 점이다. 이때 방출되는 빛은 로렌츠인자 값에 따라,  $\gamma^{-1}$ 의 퍼짐각도로 퍼져 나간다. 따라서 전자 에너지 2.5GeV로 가동하는 방사광가속기는  $\gamma$ 값이 약 5,000이므로 수직방향의 퍼짐각도는 약 0.2mrad, 즉 0.0115°에 지나지 않는다. 그러나 수평방향의 퍼짐각도는 2극자석에서의 전자궤도의 회전각도만큼 퍼진다. PLS의 경우 36개의 2극자석에 의해서 각각 0.175rad 퍼짐의 얇은 부채꼴 모양의 빔이 방출되나 대충 30~40mrad 정도만 활용하고 나머지는 광자가리개(photon stop)로 차단된다. 이 넓은 방사광빔을 나누어 하나의 휨자석당 두 개 또는 세 개의 방사광관이 설치가 가능하다.

저장링의 직선구간에 설치된 삽입장치(insertion device)는 2극전자석보다 매우 질이 우수한 방사광을 만든다. 삽입장치는 크게 언둘레이터(undulator)와 위글러(wiggler)로 구분한다. 2극전자석은 N-S가 한쌍인데 비하여 삽입장치는 N-S를 여러 쌍 번갈아서 배치하여 빔이 운동하는 것처럼 전

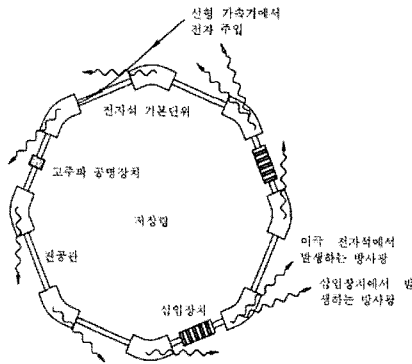


그림 5. 저장링의 구조

자를 흔들어 구부러진 산과 골에서 방사광을 발생시켜 빛을 더 밝게 한다 (그림 6 참조). 또 자기장의 세기를 높여서 방사광의 에너지를 높여 주기도 한다. 삽입장치로부터 발생한 방사광은 휨자석의 그것에 비하여 더 밝고 에너지가 높으며 광의 크기가 작아서 집속의 효과가 높다.

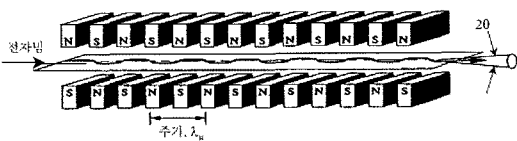


그림 6. 삽입장치.  $\lambda_u$ 는 주기

### 5. 가속기 연구의 전망

이상과 같이 살펴본 가속기는 현재에도 그 활용범위가 광범위하게 확대되고 있다. 항만에서 수입화물의 검색에 사용될 수 있는 검색용가속기가 도입되고 있고, 공항에서도 검색용가속기에 대한 필요성이 대두되고 있다. 의료용가속기쪽은 최근에 국립암센터에 설치가 완료된 싸이클로트론은 양성자빔의 에너지가 250MeV로 국내 암치료연구에 획기적인 전기를 마련할 것으로 기대된다.

방사광가속기 분야도 현재 가동 중인 3세대 방사광가속기보다 빛의 밝기가 10억배 밝은 제 4세대방사광가속기의 건설이 추진되고 있다. 미국은 이미 스탠퍼드 선형가속기에서 LCLS(Linac Coherent Light Source) 프로젝트를 추진하고 있고[6], 독일도 DESY 연구소가 주축이 되어 유럽의 프로젝트로 EU-FEL을 추진하고 있으며,

일본도 SCSS(SPring-8 Compact SASE Source) 프로젝트를 추진 중에 있다[7]. 포항가속기연구소도 수 년 전부터 4세대 방사광가속기의 중요성을 인식하고 기초 연구 및 설계를 진행해오고 있다.

방폐장의 결정으로 본격적으로 추진이 진행될 양성자가속기 프로젝트도 큰 파급효과를 줄 것으로 기대된다. 양성자가속기의 빔 에너지가 1GeV급으로 올라가게 되면 본문에서 언급된 것처럼 필연적으로 초전도공동이 사용되어야 한다. 또한 본문에서 언급된 ILC 프로젝트에 우리나라도 적극적으로 참여할 예정이다.

위에서 설명된 3개의 큰 가속기 프로젝트(ILC, 4세대방사광가속기, 양성자가속기)는 모두 초전도 공동을 사용한다. 4세대방사광가속기 프로젝트 중 LCLS와 SCSS는 상전도공동을 사용하지만 초전도공동을 사용하게 될 EU-FEL의 성능이 가장 우수할 것으로 예상되고 있다. 최근에 건설되는 3세대방사광가속기도 초전도공동을 사용하는 추세로 바뀌고 있다. 가속기연구의 방향이 이제는 초전도공동으로 무게중심이 바뀌고 있는 추세이다. 이러한 흐름에 발맞추어 국내 연구기반이 취약한 초전도공동에 대한 기초 연구연구가 시급히 요구되는 시점이다.

### 참고문헌

- [1] <http://www.lightsources.org/cms/>
- [2] <http://lcdev.kek.jp/>
- [3] <http://www.sns.gov/>
- [4] Thomas P. Wangler, *Principles of RF Linear Accelerator*
- [5] 이동녕, 신현준, *방사광 과학과 입문*
- [6] <http://www-ssrl.slac.stanford.edu/lcls/>
- [7] <http://www-xfel.spring8.or.jp/>

### 저자이력



**강홍식(姜興植)**  
1984-1988년 서울대학교 원자핵공학과, 1988-1990년 서울대학교 대학원 원자핵공학과, 1990-1998년 서울대학교 대학원 원자핵공학과 (Ph.D), 현재 포항가속기연구소 책임연구원