

고에너지물리학 분야의 초전도공학 기술의 응용

손 영 옥
포항가속기연구소

1. 서 론

유사 이래 과학은 크게 두 갈래로 발전되어 오고 있는데, 20세기 초반까지 지구를 탈출하지 못했던 기술력이 발전을 거듭하면서 넓은 세계에 대한 호기심으로 우주로 나아가서 지구뿐만 아니라 태양계나 우주의 생성 비밀을 캐려는 확대지향적인 한 축이 있다. 다른 한편에서는 점점 더 작은 물질에 근접하여 물질생성의 비밀에 접근하려는 노력이다. 후자의 축소지향적 방향에서 인간의 지식욕을 채워줄 수 있는 분야가 바로 고에너지물리학 분야로 하전입자빔 (Charged particle beam) 가속기 (Accelerator)가 매우 유용한 장치로 이용되고 있다. 가속기는 전자기 에너지로 하전입자를 에너지가 높은 상태로 가속시키는 장치이다. 가속기를 이용하여 미립자들의 존재와 특성들이 하나씩 베일이 벗겨지고 또 다른 소립자들이 발견되면서 이들을 규명하기 위해서 더 큰 에너지의 하전입자빔이 요구되었다. 이러한 요구와 1950년대 후반 안정적이고 제작성이 우수한 초전도소재인 NbTi가 개발됨으로 해서 초전도체가 고에너지물리학 (이하 가속기) 분야에 응용되기 시작하였다. 전기적 저항이 없어서 철심의 포화자기장의 한계를 벗어남으로 해서 양성자와 같이 질량이 크거나 매우 높은 에너지를 가진 하전입자들을 쉽게 가속하고 궤도운동을 안정적으로 유지할 수 있게 되었다.

한편 초전도체의 응용은 위와 같이 과학 분야에서 선도적으로 기술을 개발하고 이용함으로써 일반 산업기술 분야로 파급되어 오고 있다. 또 안정적이고 가공제작성이 우수한 고온 초전도체가 개발되어 일반화 될 때까지도 이러한 구조는 계속될 것으로 전망된다.

가속기에서 초전도의 응용범위는 매우 다양하다. 전자나 양성자와 같은 하전입자빔을¹⁾ 초전도 RF 공동기(이하 RF cavity)를

통하여 마이크로웨이브 에너지를 가하여 가속시키거나 외부 에너지를 전달하고, 초전도 굽힘자석 (Bending magnet)으로 입자빔을 궤도운동하게 하며, 집속자석으로 입자의 궤도를 유지시키고, 초전도 검출기 (Detector)를 이용하여 고에너지로 가속된 입자빔 끼리 충돌하여 발생된 소립자들의 궤도를 분석하여 물질연구의 자료를 제공한다. 또 방사광(Synchrotron radiation)가속기²⁾ 직선구간에 주기가 짧은 자석쌍 (N-S)을 여러 개를 배치한 특수한 자석인 삽입장치(Insertion device)를 설치하여 광자빔들의 간섭에 의하여 매우 높은 휘도 (Brightness)의 방사광을 발생시킨다.

가속기에 응용되는 초전도는 크게 자석응용분야(직류)와 RF cavity 응용분야(교류 혹은 고주파) 두 가지로 분류되는데 이에 대한 초전도이론을 2장에서 간략히 설명하였다. 3장과 4장에서 가속기 초전도자석과 초전도 RF cavity에 대한 기술적 기초를 각각 간략히 설명하였다.

2. 초전도 이론

초전도자석과 RF cavity의 특성은 초전도체 자체의 물리적 특성에 밀접한 관계가 있어 가속기의 구성장치로서 초전도장치설계, 제작 및 안정적이고 효율적 운전 등을 위하여 초전도이론에 대한 충분히 이해가 필요하다.

초전도에 대한 일반적이고 기본적인 특성들은 여러 문헌에 자세히 기술되어 있다. 특히 초전도 응용을 위한 간략한 설명은 Martin N. Wilson[1]이나 YukiKau

- 1) 가속운동하는 개별적 입자들이나 입자들의 뭉치들을 일컫음.
- 2) 방사광가속기는 빛 (photon)을 이용하기 위한 목적으로 지어진 가속기로 3세대 가속기라 함.

Iwasa[2] 등에 잘 기술되어 있다. 반면 초전도 고주파 RF에 대하여는 아직 일반적으로 받아들여지는 확립된 이론은 없다. 그러나 여러 가지 가설적 모델과 실험으로 접근해오고 있는데, 이에 대한 논의가 Hasan Padamsee에[3] 잘 기술되어 있다. 본 논문에서는 국내에서 연구가 이루어 지지않고 있는 고주파 초전도이론에 대하여만 간략히 소개하고자 한다.

에너지 소실이 전혀 없는 직류전류(DC) 초전도체와 달리 교류전류(AC)에 대한 초전도체는 에너지 소실이 동반된다. 고주파 자기장은 상전도체와 마찬가지로 매우 얇은 표면층에만 침투하여 흐르는데 Cooper 쌍전자(Paired electron)를 이루지 못한 전자들이 진동하면서 에너지손실을 가져오는데 이것이 표면저항으로 나타난다. 상전도 공동기의 표면저항은 $R_{surf} = 1/(\delta\sigma)$ 로 δ 는 침투깊이로 주파수에 역비례하고 σ 는 도체의 전기전도도로 비교적 간단한 거동을 보인다. 반면 AC전자기장에 대한 초전도체는 2상(two-phase) 모델과 같은 다소 복잡한 가설로 설명할 수 있다. 초전도체에 흐르는 AC전류는 Cooper 쌍전자(Superfluid 성분)에 의한 유동과 비쌍(Unpaired)전자(상전도 성분)에 의한 유동의 합이다. 즉 전류 밀도는

$$J_s = J_n + J_s = \sigma E_0 \exp(i\omega t) \quad (1)$$

여기서 전기전도도 σ 는 $\sigma = \sigma_n + i\sigma_s$ 이고 t 는 시간, ω 는 주파수, 첨자 n 과 s 는 각각 상전도와 초전도이다. 식(1)의 임피던스의 real 값이 침투깊이 λ_L 의 표면저항으로

$$R_{surface} \propto \sigma_n / (\lambda_L \sigma_s^2) \quad (2)$$

이다. 이식으로부터 초전도 RF의 표면저항은 상전도 상태의 전기전도도에 비례함을 알 수 있다. London 1차식과 전류밀도 식으로부터 유도한 초전도 전도도와 상전도 전도도(Drude 식)를 식(2)에 대입하고, BCS 이론[4]을 도입하면 다음의 RF BCS 표면저항을 구할 수 있다.

$$R_{BCS} \propto \lambda_L^3 \omega^2 l \exp\left(-\frac{1.76 T_C}{T}\right) \quad (3)$$

여기서 T_C 은 임계온도 이고 l 은 비쌍전자의 평균자유운동거리임.

식(3)으로부터 고주파 초전도체의 표면저항은 온도에 지수적으로 비례하고 주파수에

2승에 비례함을 알 수 있다. 그러나 AC자기기장에서도 임계주파수가 있어 무한정으로 높아질 수 없는데 약 2 GHz 정도가 한계이다. 고주파 초전도체의 총 표면저항은 BCS 표면저항과 도체의 온도와 상관없이 초전도체에 함유된 불순물, 표면오염 또는 격자의 뒤틀림 등에서 오는 잔류저항의 합이다. 즉

$$R_{surface} = R_{BCS} + R_{res} \quad (4)$$

잘 준비된 초전도체의 잔류저항은 수 $n\Omega$ 수준이지만 불순물에 표면오염 정도에 따라서 쉽게 증가할 수 있는 특성이다. 그림 1에서 초저온부의 저항은 잔류저항에 의한 영향으로 온도와 무관함을 알 수 있다. RF 초전도체에 불순물의 척도가 되는 것이 잔류저항비(Residual Resistance Ratio: RRR, 초저온 상태에서 상전도 phase의 저항에 대한 상온에서 초전도체의 저항에 대한 비)로 고주파 RF cavity는 일반적으로 250 이상인 소재를 이용한다.

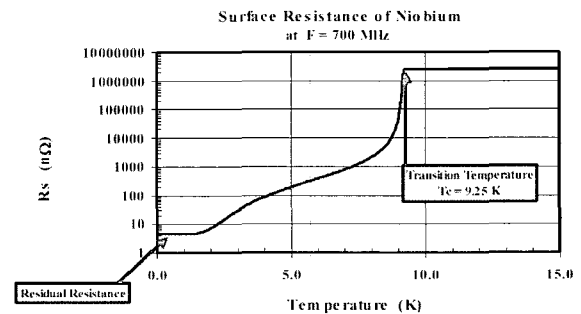


그림 1. 700 MHz에서 Niobium의 고주파 표면저항의 온도함수

고주파 초전도 RF에서 가속전기장은 고주파 임계자기장, $H_{rf, crit}$ 에 직접적인 제한을 받는데, 에너지평형 조건으로 설명이 가능한 DC 임계자기장에 비하여 AC 임계자기장은 훨씬 더 복잡한 설명 모델이 필요하다. 외부 자기장이 없을 경우 임계온도 T_C 에서 엔트로피의 연속성을 유지하면서 상전이(Phase transition)가 일어난다. 그러나 외부 자기장이 있을 경우 임계온도 $T_C(H)$ 에서 역시 상전이가 일어나지만 엔트로피의 불연속성으로 인하여 잠열이 개입된다. 이러한 엔트로피 불연속성으로 인하여 $H > H_c$ 경우 준안정적 과열(metastably superheated) 초전도 상태가, 그리고 $H < H_c$ 경우 준안정적 과냉각(subcooled) 상전도영역이 존재할 수 있다. 상전이 과정

에서 이들의 경계가 발생하는데 DC 자기장 하에서 제1종 초전도체는 열역학적 임계자기장에서부터 과열 자기장, H_{sh} 까지 "Meissner" 상태가 준안정적으로 지속될 수 있다. 이 조건으로부터 과열자기장은 다음과 같다.

$$H_{sh} = \frac{1}{\sqrt{\kappa_{GL}}} H_C \quad (5)$$

여기서 $\kappa_{GL} = \lambda_L / \xi$ 로 Ginzburg-Landau parameter이고, ξ 는 Cooper 쌍전자의 밀도가 1/2로 decay 하는 결합(coherence) 거리임.

과열자기장에서 준안정성은 완전히 사라진다. 제2종 초전도체에서 역시 1차 임계자기장, H_{C1} 이상에서 위와 같은 조건이 성립한다. 고주파 상태에서 자기장은 $\sim 10^{-9}$ 초의 시간으로 자기장이 변하는 반면 상전이는 $\sim 10^{-6}$ 초의 시간으로 변함으로 H_{sh} 자기장까지 준안정적인 초전도 상태가 유지될 수 있다. 따라서 고주파 임계자기장은 H_{sh} 와 같다. Abrikosov-Ginzburg 식으로부터 H_{sh} 를 계산할 수 있는데, 실험결과들에 크게 벗어나지 않는다[4].

$$H_{sh} = \sqrt{2} \frac{H_C(0)}{\sqrt{\kappa(0)}} \cdot [1 - (T/T_C)^4] \quad (6)$$

여기서 $\kappa(0)$ 는 절대온도 0에서 Ginzburg-Landau parameter임.

3. 가속기용 초전도자석

가속기에서 이용되는 초전도자석은 몇 가지의 우월적 장점을 지니고 있다. 초전도자석의 자기장이 상전도 자기장에 비하여 균일하여 궤도운동하는 입자빔의 안정성이 매우 우수하다. 또 입자물리용 가속기는 입자빔의 에너지가 매우 높아 [예: HERA의 입자빔의 에너지는 820 GeV 임.] 상전도 전자석으로 비현실적이어서 초전도 자석이외에는 대안이 없는 경우도 있다. 상전도 전자장을 이용하는 가속기에 비하여 수명기간동안 에너지비용을 크게 - 초전도장치 냉각유지비용을 고려하더라도 - 줄일 수 있다. 장치가 작아 공간을 절약함으로써 건설비가 절감된다. 반면 초기의 개발제작비가 많이 소요되며 제작설치가 까다롭고 많은 시간이 소요된다. 또 상전도 자석에서 볼 수 없는 Quench 현

상이 발생 할 수 있는데, 이로 인하여 비의도적 운전정지 (Trip)가 발생할 수 있다. 1983년 미국의 Fermi 국립연구소(FNAL)의 Tevatron³⁾ 가속기를 초전도자석으로 최초로 건설된 기점으로 많은 가속기들이 초전도자석을 채용하였으며, 대표적인 가속기로는 독일 DESY의 HERA, 프랑스 CERN의 LHC와 RHIC 등이 있으며, 현재 개념설계를 하고 있는 국제충돌선형가속기(International Linear Collider: ILC)도 이미 초전도형으로 건설하는 것이 결정된 상태이다.

대형 초전도 입자가속기에서 굽힘자석과 집속자석이 대표적인 것으로 용도에 따라서 약 20여 종류의 초전도 자석이 설치된다. 자속밀도는 대략 5-10 T 내외로 설계하는데, 얇은 NbTi 가닥으로 이루어진 Strand를 여러 가닥으로 꼬아서 만든 초전도 케이블로 코일을 감는다. Winding된 초전도 코일내부에 strand가 균일하게 배치되게 하여 field error를 방지하고 strand 간 미끄럼을 방지하여 quench를 예방하기 위하여 폴리머 같은 것으로 함침 한다. 초전도 코일에는 수십에서 수백 MPa의 Lorentz 력에 의한 반발하중이 가해지기 때문에 이를 적절하게 분산시키고 잡아주기 위해서 초전도코일에 각 부위별로 collar로 pre-stress를 가하여 운전 stress를 관리한다. 한편 초전도 코일에 철심(iron yoke)를 적절히 배치하여

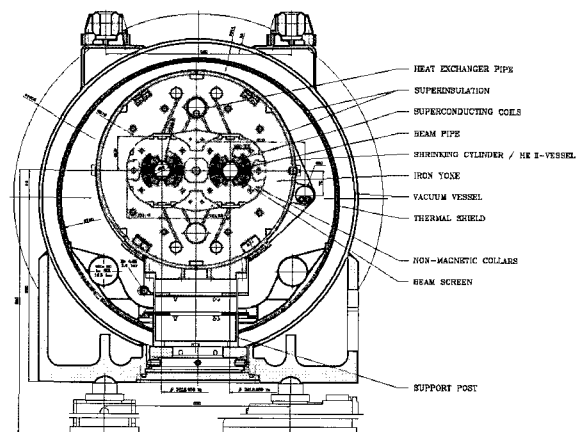


그림 2. 프랑스 CERN의 LHC 초전도 굽힘자석 조립도

3) proton-antiproton 충돌가속기로 방사광도 부수적으로 이용함.

자석의 가장자리를 통해서 밖으로 흩어지는 자기장을 자석내부에 갇히게 하여 자석의 효율을 높이면서 입자빔의 궤도영역에 자기장 분포를 균일하게 하고 또 외부로 누출되는 자기장을 차단함으로써 외부장치에 대한 영향을 최소화하게 한다. 그림 2는 CERN의 LHC에 설치된 초전도 휩자석 단면도로 최대자기장이 9.5T이고 초저온부의 직경은 0.57m, 길이는 약 15.14m 그리고 초저온부 질량은 약 31 ton 이다.

자석은 가속기에서는 하전입자를 운동궤도를 안내하고 궤도에서 약간 이탈된 입자빔을 집속하는 기능을 담당 한다. 가속기에서 초전도자석은 크게 굽힘자석 (Dipole), 집속(Quadrupole)과 삽입장치(Insertion device- undulator, wiggler) 3가지로 분류할 수 있다. 굽힘자석은 N-S극이 1쌍으로 이루어져있으며 운동하는 하전입자 (z-방향)가 이 자기장 (y-방향)에 놓이면 Lorentz력 [$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$, q: 전하의 세기, v: 입자빔의 속도, B: 자기장]은 x-방향으로 휘어져 궤도가 수정되며, 자기장의 세기에 따라서 휘는 각도가 결정된다. 예를 들면 포항가속기의 굽힘자석은 1.3T의 자기장으로 에너지 2.5 GeV의 전자빔을 10° 휘게 하는데, 36대의 휩자석으로 360°의 원주궤도 운동을 한다. 굽힘반경, ρ 는 $\rho = P/(qB)$ 에서 하전입자의 운동량 (momentum) P에 의해서 결정된다. 또 궤도가 휘어지면서 그의 접선방향으로 passive 한 radiation이 발생하는데 이를 방사광 (Synchrotron radiation) 이라한다.

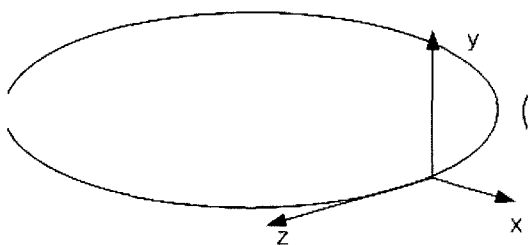


그림 3. 입자빔의 운동 좌표계

자석의 제작이나 설치시에 개입되는 error에 의해서 불필요한 고차원 자기장이 발생하는데 이들로 인해서 하전입자가 정해진 궤도에서 이탈하게 된다. 즉 Lorentz력 발생기구에서 입자빔의 속도와 자기장이 서로 직교해서 만나지 않으면 입자의 운동방향

과 다른 쪽으로 힘을 가해서 궤도에서 이탈되게 된다. 이탈량이 누적되면 입자빔이 진공챔버벽을 쳐서 소실되고 또 불필요한 발열을 일으키는 등의 부작용을 유발한다. 이탈된 입자를 다시 궤도로 복원시키는 것이 집속자석이며 고차원 자기장특성에 따라서 4극, 6극 등등의 자석으로 교정한다. 4극집속자석은 그림 4에서 보는 것과 같이 궤도에서 많이 이탈된 입자는 큰자기장하에 놓이게 하고 설계궤도에 있는 입자(y=0)는 집속자기장이 필요 없다. 따라서 입자가 지나다니는 영역에 $B_y = B_0 y$ 가 되게 자석을 설계한다. 즉 좌표계에서 x와 y축을 따라서 자기장구배를 가지게 설계된다. 비슷한 개념으로 6극집속자석은 N-S극이 3쌍으로 각 120° 되게 자기장이 분포된 것으로 에너지 차이에 의해서 궤도를 이탈한 입자를 집속한다.

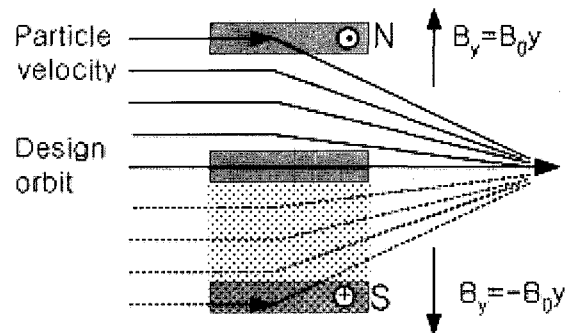


그림 4. 4극-집속자석의 집속원리

삽입장치는 3세대4) 방사광가속기에 필수적인 장치로써 N-S극이 반복되는 구조로 배치하면 입자빔은 각 N-S쌍을 만날 때 마다 휘어져 뱀의 운동과 같은 연속적인 흔들림 궤도를 만드는데 이들 곡면의 모든 접선방향에서 발생하는 방사광이 서로 중첩간섭되어 방사광의 flux, 즉 밝기가 2극 굽힘자석에서 나오는 것보다 수십에서 수백만배 높다. 4세대 가속기에서는 삽입장치를 길게 하여 입구부분의 입자빔에서 발생한 radiation이 출구영역의 입자를 뭉치게(Bunching up) 작용하여 뭉쳐진 입자덩어리에서 자유전자 레이저(Free electron laser)를 발생시키는 역할을 한다. 따라서 4세대 삽입장치는 설계에 따라서 달라지겠지만 충분히 길어져야 하는

4) 방사광을 이용하기 위한 목적으로 설계된 가속기를 Synchrotron (radiation) accelerator라 부르며 3세대 가속기로 분류됨.

데 포항가속기의 4세대 광원장치에는 약 50m 정도로 설계되고 있다. 그림 5은 4세대 광원에 이용될 수 있는 small gap undulator 이다.

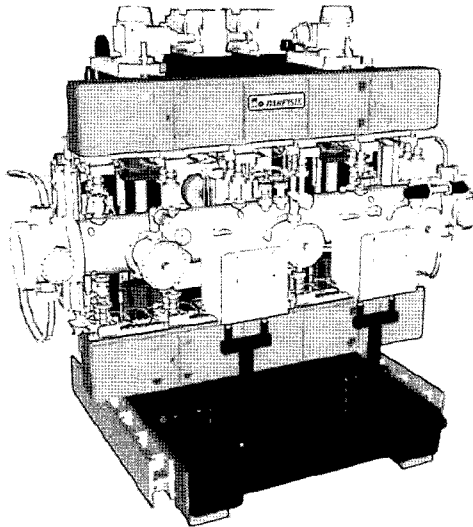


그림 5. 삽입장치의 조립도 (Danfysik)

4. 초전도 RF cavity

입자빔에 에너지를 공급하는 RF cavity는 자석과 함께 입자가속기의 핵심장치이다. 고주파로 공급되는 마이크로웨이브 에너지를 입자빔이 RF cavity기에서 공명을 일으켜 마이크로웨이브로부터 에너지를 흡수한다. 초전도 RF cavity는 평균가속전기장, E_{acc} 와 Quality factor Q_0 로 성능을 평가한다. 가속전기장은 RF cavity 내부에서 입자빔의 운동방향의 전기장성분으로 에너지원이며 Quality factor는 cavity 표면에서 소실된 에너지에 대한 저장된 에너지의 비로 cavity에서 마이크로웨이브의 의한 표면저항과 기하형상에 의해서 결정되는데 공동기의 성능척도(figure of merit)이다. 즉 일반적으로 E_{acc} 와 Q_0 는 높을수록 좋은 cavity라 할 수 있다. 초전도 RF cavity의 Q_0 는 약 $10^9 \sim 10^{10}$ 범위로 이를 토대로 주파수 500 MHz, $E_{acc}=1$ MV/m의 성능을 가진 상전도, 초전도 cavity를 비교하면 Q_0 는 각각 2×10^9 vs 2×10^4 이며, 두 cavity에 대하여 모든 에너지 요소를 고려한 power 비는 약 200으로 초전도 cavity가 현저히 우수함을 알 수 있다. CERN의

LEP와 같은 가속기는 총 2.5 GV의 전압이 필요한데 이는 상전도 cavity로는 제작 자체가 불가능하다 [제작 가능한 copper cavity의 온도상승이 100°C 이상이 됨.].

고주파 초전도체는 초전도자석과 달리 순수 Nb를 이용하는데 비록 임계자기장이 합금에 비하여 낮지만 초전도 RF cavity 특성상 기계가공이나 프레스 등과 같은 제작성이 우수하여 현대의 초전도 RF cavity는 거의 이 소재를 이용한다. 따라서 고주파 초전도 RF 용으로 특별히 소재를 생산하는데 불순물의 함유량을 최소화 하여 RRR이 일정 수준이상 되게 하고 또 적절한 조건으로 열처리하여 조직이 균일하게 하는 것이 중요하다. 불순물이 초전도 도체 속에 상전도영역의 씨앗이 되어 직류에 비하여 매우 심각한 완전히 다른 양상의 열적과괴현상(Thermal breakdown)을 보일 수 있다. 또 불순물이 초전도영역인 Cooper 쌍전자가 이동하는 것을 차단하여 고주파 전기저항을 증가시킨다. 불순물로는 Nb 원광석에 섞여 있는 Ta의 함유량이 가장 높으며 W, Zr, Hf, Ti 등이 소재 생산과정에서 함유된다. 또 조직들 사이에 O, B, C, H 등이 포함되는데 이들 원소는 고주파 환경에서 초전도 임계 자기장이나 열전도도를 낮추거나 전기저항을 높이는 역할을 한다.

제작은 Nb 블록을 가지고 기계가공으로 만드는 방법, 얇은 Nb 판(sheet: 두께 3mm 내외)으로 그림 6과 같이 대칭면을 기준으로 반쪽 cell 두 장을 포개어 전자빔 용접(Electron Beam Welding: EBW)으로 cavity를 만드는 방법, 그리고 copper를 가지고 위와 같은 방법으로 cavity를 제작하고 RF 표면에 Nb를 코팅하는 방법으로

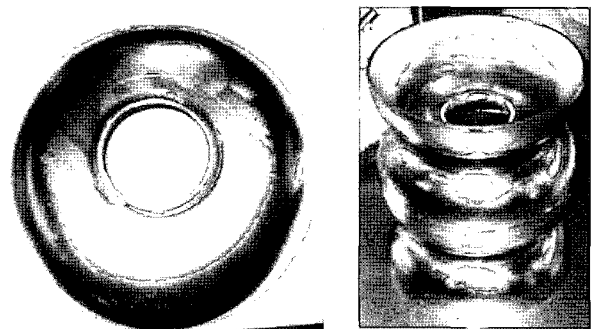


그림 6. Half-cell 및 cavity 접합공정

제작되어 왔다. 첫 번째 방법은 고가인 Nb 소재의 경제성 문제로 초장기에 이용되었던 제작법으로 이제 거의 이용되지 않고 있으며, 구리 cavity에 Nb 코팅하는 제작법은 소재의 이용효율은 양호하지만 얻을 수 있는 가속전기장의 한계가 낮아서 일반화되지 않은 기술이다. Pressing 법 (통상 Deep drawing 법이라 함.)은 비교적 쉽게 제작할 수 있고 검증된 기술로써 보편화된 제작법이다. 이 기술은 현재 건설중인 독일 DESY 연구소의 차세대 방사광원인 XFEL (X-ray Free Electron Laser) 건설에 채택되었으며 건설을 위한 설계단계에 있는 차세대 국제충돌가속기(International Linear Collider: ILC)에 기본설계안 (Basic Configuration Design: BCD)에도 채택된 것이다.

Deep drawing은 그림 7과 같이 암수로 각각 제작된 금형에 Nb 판을 프레스로 성형하는 제작법으로 Nb 판의 연성이나 탄성 등이 적절하여 성형성이나 pressing후 spring-back 현상에 의한 형상외곡이 거의 무시할 정도이다. Pressing된 half-cell을

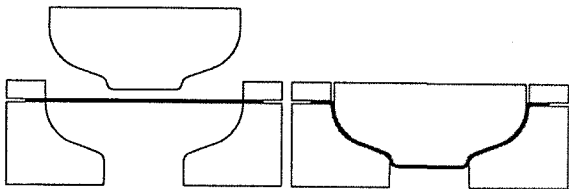


그림 7. Deep drawing 제작도

선반과 적절한 치공구를 이용하여 마무리 가공하고 이들을 서로 맞대어 전자빔으로 용접한다. RF cavity 형상특성상 내부 RF 표면에 직접 용접을 할 수 없기 때문에 침투력이 우수한 EBW를 이용한다. 또 EBW는 진공 환경 ($\sim 10^{-6}$ Torr)에서 이루어져 불순가스들이 Nb와 반응을 방지할 수 있다. 일반적으로 EBW는 집속된 전자빔을 쓰는데 비해서 Nb 용접에서는 약간 비집속빔으로 발열부를 비교적 넓게하고 용접이 underbead되게 하여 부드럽고 완만한 용접부가 되게 하는 것이 중요하다. 초전도 RF cavity 제작에서 brazing이나 TIG 용접은 초장기에 연구가 진행되었으나 현대에는 EBW가 유일한 접합법이다.

초전도 RF cavity의 성능은 설계단계에서 RF 표면의 모양이 가장 중요하다. 즉 초전도 cavity는 가속전기장은 높고 자기장은5) 작은 것이 유리한데 주어진 주파수에 대하여 적절한 cavity 형상을 최적화하여 이를 실현한다. 최적화 설계된 초전도 cavity에서 성능은 cavity 제작후 표면조건에 좌우한다. 소재단계에서 함유한 불순물(금속, 비금속), 제작과정에서 침투된 불순물이나 표면결킴, 오일이나 기타 물질에 의한 오염 등이 성능을 제한한다. 소재에 포함된 불순 금속은 소재선별과정에서 완벽하게 제외되지만 나머지 불순물들은 표면후처리에서 거의 완벽에 가깝게 제거되어야 한다. 이를 위한 몇가지 까다로운 제거과정을 거쳐야 한다. 먼저 표면결킴은 세라믹원심연마기(Centrifugal Barrel Polishing: CBP) 같은 장치를 이용하여 기계적 연마를 통해서 제거하는데 한계깊이가 약 $100\mu\text{m}$ 로 그 이상인 것은 half-cell 용접전에 조치를 해야 한다. CBP후에 산(Acid: 불산, 질산, 인산의 체적비를 1:1:1로 배합)을 이용하여 화학연마(Chemical Polishing: CP)를 하는데 산에 담그는 시간을 제어하여 통상 $100\mu\text{m}$ 를 표피를 제거한다. CP후 표면 거칠기 가액 $1\sim 5\mu\text{m}$ 정도를 얻을 수 있다. 가속전기장이 낮은 cavity 라면6) CP만으로도 충분한 성능을 낼 수 있지만 그 이상에서는 운전되는 cavity는 추가적인 conditioning이 필요하다. CP를 비롯한 선행 제작과정에서 RF 표면에 침투한 불순 가스는 표면저항을 높이거나 상전이(Phase change)가 원활하게 이루어지지 않아서 RF 초전도성 부분적으로 방해받을는데, 이들 불순가스를 약 $750\sim 800^\circ\text{C}$ 정도 진공(10^{-6} Torr)로에서 약 3시간 정도 열처리(Annealing)하면 상당부분 RF 표면에서 제거된다. CP로 연마된 cavity의 표면은 입계(grain boundary)가 날카로워서 이들에서 자기장이 집중으로 쉽게 입계자기장을 초과하게 된다. 이를 해결하기 위해서 전해연마(Electric-Polishing: EP)법을 이용한다. Cavity 내부에 황산과 불산의 혼합산을 채우고 cavity에 +극을

5) 초전도 RF cavity 운전 조건: $H_{\text{max}} @ \text{RF surface} < H_{\text{critical}}$

6) $E_{\text{acc}} \leq 10 \text{ MV/m}$

내부에 알루미늄 전극을 삽입하여 -극의 전기를 가하면 +인 cavity 표면에서 수소가 스발생과 함께 연마가 이루어진다. EP로 약 80~100 μm 정도 연마하는데 표면조도가 sub-micron 으로 연마되며 날카롭던 입체가 부드러워져 자기장 집중현상이 현저히 낮아져 가속전기장을 크게 향상시킬 수 있다. CP나 EP 처리한 cavity 표면에 화학약품이나 기타 불순물에 오염될 수 있는데 이들 역시 성능에 치명적인 결함을 줄 수 있는데, 고압의 순수(純水) spray로 헹굼하여 제거한다. 위와 같은 후처리과정을 통하여 준비된 cavity는 Class 10급 청정실에서 다른 부품들과 조립되고, 진공(10^{-6} Torr 이상) 상태에서 약 120°C 로 baking하여 RF 표면에 있을 수 있는 수소가스를 Nb 내부로 확산시켜 표면에서 RF 전기저항을 낮추면 RF cavity의 제작 전(全)공정이 완료된다.

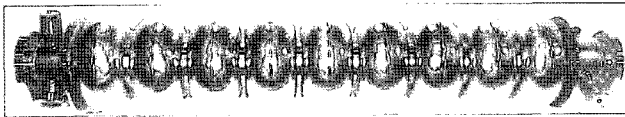


그림 8. ILC 용 저손실형 9-cell cavity [필자가 일본 고에너지가속기연구소, KEK에 파견되어 연구개발에 참여하여 제작한 4 set 중의 하나임.]

초전도 RF cavity system은 초전도 cavity를 포함하여 외부의 마이크로웨이브 파워를 cavity로 넣어주는 coupler, cavity 내부에서 발생되어 레도운동하는 입자빔에 불안정성을 가중시키는 고차원 전자기장 (Higher Order Modes: HOM)을 제거하는 HOM 제거장치, cavity의 RF 주파수를 제어하기 위한 tuner 등으로 구성 조립되며 제어신호를 pickup하기 위한 측정센서와 flange 등이 부가적으로 장착되어 있다. 이들은 액체 헬륨에 잠겨있거나 헬륨탱크 외부로 노출되어 있지만 온도는 액체헬륨과 같이 유지된다. Cavity는 가속기의 요구사양에 따라서 1-9개까지 한 piece로 제작되며 1 piece당 자신의 cryostat를 가지는데 이를 cryomodule 한다. Cryomodule은 각각 독립적인 cryostat으로 제작할 수도 있고, ILC나 대규모 가속기의 경우 4-8

cryomodule를 각각 연결하여 하나의 큰 진공 용기내부에 장착하여 완전한 cryostat를 구성한다.

Cryostat에는 cavity의 성능이나 냉각을 효율적으로 유지할 수 있는 각종 보조장치나 기구들이 조립된다. 그림 9는 미국의 Brookhaven 국립연구소 (BNL)에서 4세대 방사광에 설치를 목적으로 개발된 초전도 RF cavity system이다.

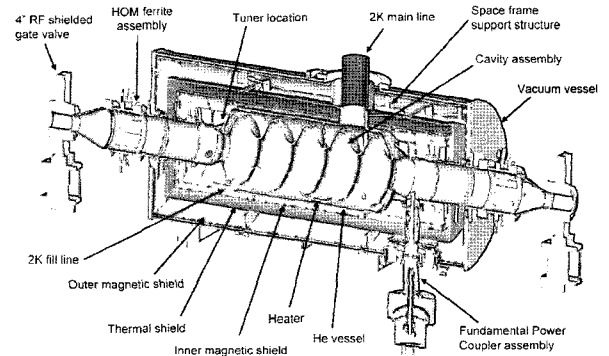


그림 9. 초전도 RF cavity system의 일반적 구성 [7]

참고문헌

- [1] Martin N. Wilson, Superconducting Magnets, Oxford Science Publication, 1990
- [2] Yukikazu Iwasa, Case Studies in Superconducting Magnets, Plenum Press-New York and London, 1994
- [3] Hasan Padamsee, Jens Knobloch, Tom Hays, RF SUPERCONDUCTIVITY FOR ACCELERATORS, JOHN WILEY & SONS, 1998
- [4] J. Bardeen et al. Phys. Rev., 108, p. 1175 (1957)
- [5] K. Saito, Theoretical Critical Field in RF Application, Workshop for Pushing the limits of RF superconductivity, Sept. 22-24, 2004, Argonne National Laboratory
- [6] <http://public.web.cern.ch/Public/Content/Chapters/AboutCERN/CER>

[NFuture/WhatLHC/WhatLHC-en.html](#)

[7]I. Ben-Zvi, New SRF Cavity Geometry for High-Current Applications, Workshop for Pushing the limits of RF superconductivity, Sept. 22-24, 2004, Argonne National Laboratory

저자이력



손영욱(孫永旭)

1981-1987년 경북대학교 기계공학과, 1988-1990년 한국과학기술원 핵공학과, 1996년~2006년 포항공과대학교 기계공학과, 1988-1991년, 한국전력 전문원 1991-현재 포항가속기연구소