

'99 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

자유전자레이저 및 전자빔 조사용 대전류 전자빔 가속기

A High-Current Electron Accelerator for Free-Electron Laser and Irradiation System

조성오, 이병철, 김선국, 정영욱, 차병헌, 이종민

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 유성우체국 사서함 105호

요 약

고출력 자유전자레이저 및 전자빔의 산업적 이용을 위한 대전류 전자빔 가속기를 개발하였다. 개발된 가속기의 주요 구성요소는 전자총, buncher cavity, acceleration cavity, 전자빔 측정장치 및 전자빔 광학계, 포집기와 RF 발생장치 등으로 이루어져 있다. 대전류 전자빔이 가속중에 발생할 수 있는 불안정성을 줄이기 위해 180 MHz의 비교적 낮은 RF 주파수를 사용하였다. 가속기에서 발생하는 전자빔의 최대 에너지는 2 MeV, 평균 전류는 50 mA이다. 전자빔은 약 350 ps의 폭을 가진 펄스 형태로 인출되는데 전자빔의 반복율을 0 - 22.5 MHz로 조절함에 따라 평균 전류를 조절하게 되어 있다.

Abstract

A high-current electron accelerator has been developed for the application of high-power free-electron laser and electron irradiation system. The main components of the accelerator is electron gun, buncher cavity, main acceleration cavity, beam optics and measurement system, beam dump, and RF generator. The frequency of the RF system was chosen to be 180 MHz to reduce the possibility of beam instability which is caused by the high-current effect. The beam energy is 2 MeV and the current is 50 mA and the repetition rate can be controlled from 0 to 22.5 MHz.

1. 서론

1960년대 방사선 process가 도입되면서 전자빔 가속기의 산업적 이용이 현저히 증가하고 있다[1]. 방사선 process에는 주로 방사성 동위원소, X-ray, 전자빔 가속기 등이 이용되고 있다. 전자빔 가속기는 방사성 동위원소와는 달리 필요할 때만 방사선을 발생시킬 수 있으므로 저장이나 처분을 위한 특수한 시설을 갖추지 않아도 되고, 한 장치로도 전자빔 이외에도 물질과 충돌로 중성자나 X-선 등의 이차적으로 발생하는 방사선을 이용할 수 있으며, 에너지가 수 eV에서 수 GeV를 가진 전자빔을 발생할 수 있어 방사성 동위원소로 발생할 수 없는 에너지를 가진 방사선을 발생할 수 있어 활용분야가 다양하며, 하나의 장치로도 전자빔의 에너지를 넓은 범위에 걸쳐 변화시킬 수 있어 여러 분야에 활용 가능하다는 이점이 있다. 이러한 특징으로 인해 최근 전자빔 가속기의 응용분야는 원자로 재료의 방사선 손상 (radiation damage) 연구 및 재료 특성 개선, 고감도 방사선 검출기 제조, radiotherapy, 비파괴 검사 등의 원자력 분야뿐만 아니라, 반도체 제조, 식품 및 의료기구 살균, 폐수 및 배기가스 처리, 초전도체 및 기타 자성체 물질의 특성 개선, 보석착색, 희소물질검출, 신소재 개발 등의 광범위한 산업분야에 걸쳐 있으며 그 활용분야는 점점 더 증가하고 있다[2-5].

또한 고효율 자유전자레이저를 구동하기 위해서는 평균전류가 높으면서도 전자빔을 발생하는 가속기가 필요하다. 이 때 발생된 전자빔의 에미턴스, 에너지 분산등의 전자빔 특성은 자유전자레이저 구동에 적합하여야 한다. 고효율 자유전자레이저 개발을 위한 대전류 전자빔 가속기에는 초전도 가속관을 이용한 장치[6, 7]와 상전도 가속관을 이용한 장치[8, 9]등이 개발되어 있다.

한국원자력연구소에서는 고효율 자유전자레이저 및 전자빔의 산업적 이용을 위해 개발된 대전류 전자빔 가속기 장치를 개발하였다. 가속기에서 발생하는 전자빔의 에너지는 2 MeV, 전류는 최대 50 mA이다. 가속기에서는 전자빔이 약 350 ps의 폭을 가진 펄스 형태로 발생되는데 이 때 펄스의 반복율을 22.5 MHz까지 증가시킬 수 있게 되어 있다. 본 연구에서는 개발된 대전류 전자빔 가속기 장치의 설계 및 제작 특성과 각 구성요소에 대해 논의한다.

2 대전류 전자빔 가속기 시스템

대전류 전자빔 가속기 시스템은 크게 전자총, 주가속장치, 고주파 발생장치, control system으로 구성된다. 주가속장치는 buncher cavity, acceleration cavity, bending magnet, 전자빔 광학계, 그리고 beam dump로 구성된다. 또 RF 발생장치는 RF master oscillator와 amplifier, RF feeder, anode power supply 등으로 구성된다. 표 1은 전체 시스템의 주요 사양을 나타내고, 그림 1은 개발된 시스템의 외관을 그림 2는 전자빔 가속기의 구조를 나타낸다.

표 1. 대전류 전자빔 발생장치의 주요 사양

Kinetic Energy	2 MeV (max.)
Peak Current	6 A
Average Current	50 mA (max.)
Average Beam Power	100 kW
Pulse Duration	200 ps
Repetition Rate	0 - 22,5 MHz
Emittance	20 mm · mrad
RF Frequency	180,3 MHz
RF Power	263 kW

이 시스템의 가장 중요한 특징은, 대전류 전자빔을 안정적으로 가속하기 위하여 낮은 주파수(180 MHz)의 고주파를 사용한다는 점이다. 현재 전자빔 가속기의 가속관으로 많이 사용되고 있는 주파수는 500 MHz, 1.5 GHz, 2.8 GHz 등이다. 자유전자레이저에서 평균출력을 높이려면 전자빔의 평균전류를 높게 해야하는데, 전류가 높아지면 beam loading에 의해 불안정성(instability)이 발생하여 전자빔의 손실이 발생한다. 전자빔의 손실을 작게 하려면 고주파 가속관의 공진 주파수(resonance frequency)가 낮아야한다. 고주파 주파수가 낮기 때문에 전자빔 bunching system에서 pre-buncher가 따로 필요하지 않고 전자총 바로 다음에 buncher를 두어 전자빔 펄스폭을 줄인다. 또한 buncher cavity와 main

acceleration cavity가 같은 주파수의 고주파를 사용하는 점도 시스템의 구성을 간단하게 만드는 주요 요인이다. 전자총에서 발생하는 전자빔의 펄스폭은 1.6 ns이고, buncher cavity를 지나면서 0.3 ns로 압축된다.

전자빔의 최대 반복률(repetition rate)은 22.5 MHz이다. 최소 반복률은 single pulse도 가능하도록 설계하였으나 2.25 kHz부터 시작하여 점차적으로 반복률을 높이는 것이 좋다. 전자빔의 반복률을 변화시킬 때 전자빔의 손실이 발생할 수 있으므로 반복률을 증가시킬 때 정확히 제어되도록 주의해야 한다.

2.1. 전자총 (Electron Gun)

전자총은 300 keV의 펄스 전자빔을 발생시키는 장치로서, 펄스 modulator로 구동되는 cathode-grid unit, 300 kV 정전 가속관 (electrostatic acceleration tube), 300 kV DC power supply, 펄스 modulator용 전원장치, control system 등으로 구성된다. 전자총의 반복률(repetition rate)은 microtron recuperator의 운전모드에 따라 정해지는데, 최대값은 22.5 MHz이다.

전자총의 전압은 여러 가지 현실적인 제약에 의해 결정되었다. 전압이 너무 높으면 고전압 절연이나 시스템의 규모 등의 면에서 여러 가지 문제가 발생하고 비용도 많이 소요된다. 전압이 너무 낮으면 bunching 효과가 낮아 높은 peak current를 얻을 수 없다. 전압이 300 kV이면 시스템의 비용이나 규모 면에서 적당하고 bunching 효과도 충분하다.

전자빔의 펄스폭(1.6 ns)은 고주파 주파수(180 MHz)의 약 100 degree에 해당된다. 전자빔의 펄스폭이 이보다 길면 상당수의 전자빔이 bunching cavity에서 손실되고, 전자빔의 펄스폭이 이보다 짧으면 cathode-grid 펄스 구동 시스템을 제작하는데 어려움이 있다.

2.2. RF Cavity

RF cavity는 RF generator에서 발생된 RF를 시간 및 공간적으로 가두어 두는 장치로, 이때 저장된 RF로 전자빔을 의해 가속시킨다. RF cavity는 buncher cavity 1 set와 acceleration cavity 2 set로 이루어져 있다. 각 cavity의 구조는 동일하며, 이는 고주파 결합기, 주파수 교정기, 고차항 교정기, sampling loop등으로

구성되어진다. RF cavity의 내부는 무산소동이고 그 외부는 스테인레스 스틸로 되어 있으

Buncher cavity는 전자총에서 나온 전자빔의 전자빔의 펄스폭을 줄이면서 침투 전류를 증가시키는 역할을 한다. Acceleration cavity와는 달리 전자빔의 에너지를 증가시키지 않으므로 cavity 내부에 필요한 RF power도 acceleration cavity에서 보다 약 1/100이 작다. Acceleration cavity는 gap 양단에 각각 최대 850 kV의 가속전압을 발생시켜 전자빔을 가속시키는 역할을 한다. Buncher cavity와 acceleration cavity 사이의 거리(drift space)는 첫 번째 acceleration cavity의 위치에서 전자빔의 펄스폭이 최소가 되도록 정한다. 전자빔의 에너지가 300 keV일 때는 전자빔의 space charge 효과 때문에 전자빔이 퍼지게 되므로 drift space의 길이를 너무 길게 하지 않는 것이 좋다.

제작된 RF cavity의 기본 모양은 반경 650 mm, 길이 576 mm의 대칭형 원통이며 옆면은 80° 의 각도를 가진 원뿔대 모양으로 되어 있다. 이는 cavity 표면이 내부와 외부의 진공차로 인해 힘 (진공압)을 받게 되는데, 이 기계적인 힘을 구조적인 변형 없이 견디면서 같은 고주파 입력에 대해서 가속전압을 크게 할 수 있도록 만들기 위해서이다. RF cavity의 기본 동작모드는 TM_{010} 모드이고, 축 방향에 대칭인 전장분포를 갖는다. 제작된 cavity의 공명주파수는 180.4 MHz, Q 값은 44,000, shunt impedance는 7.5 M Ω 이다.

RF cavity의 재질은 고주파와 접촉하는 내부는 8 mm두께의 구리를 이용하였고 구리 외부를 7 mm 두께의 스테인레스 스틸로 cladding을 만들어 이 둘을 diffusion welding으로 접합하였다. RF와 접촉하는 RF cavity 내부는 전기전도도가 클수록 표면에서의 고주파 손실을 줄일 수 있고 또 그 표면에서 고주파 손실에 의해 많은 열이 발생하므로 열전도도가 큰 재질을 사용하여야 한다. 본 실험에서는 이를 고려해 무산소동을 사용하였다. 구리표면은 표면에서 고주파 손실면적을 줄이기 위하여 0.63 μm 의 조도를 가지도록 연마되었다. 특히 전장이 강한 부분인 빔 파이프 근처는 0.32 μm 의 조도로 정밀 연마되었다. 구리 외부를 스테인레스로 사용한 이유는 구리가 대기중에서 부식(corrosion) 및 산화되는 것을 막고 또 진공압에 의한 구조변형을 줄이기 위해서이다. RF cavity의 원통면과 옆면은 스테인레스 스틸부분을 TIG welding으로 접합하였고 이 때 내면부의 구리가 전

기적으로 잘 접촉되도록 그 구조를 만들었다. 진공압에 의한 RF cavity 구조의 변형을 알아보기 위해서, RF cavity 내부를 진공으로 만든 경우와 대기압인 경우에 대해 각각 기본 공진 주파수를 측정한 결과 약 60 kHz 의 차가 발생하였다. RF cavity 내부를 진공으로 만들 경우 cavity 측면부가 진공압으로 인해 줄어들고 그 결과 cavity의 전기용량 성분이 증가하여 공진 주파수는 줄어들게 된다. 이 값의 변화율은 공진 주파수 180 MHz에 대해 약 3×10^{-4} 정도인데 이 측정결과로 RF cavity가 진공압에 대해 기계적으로 충분히 안정도를 유지함을 알 수 있었다.

RF cavity 표면에서 발생하는 열은 정상동작의 경우 약 100 kW 까지 발생한다. 이 열에 의해 cavity 표면이 국부적으로 가열되어 구조적으로 변형될 수 있는데, 이를 방지하기 위해 스텐인레스 스틸과 구리 사이에 냉각 채널을 만들고 이 사이에 순수를 흘려줌으로써 cavity 표면을 냉각시킨다. 냉각 채널은 냉각수에 의한 구리의 부식을 줄이기 위해 구리와 직접 닿지 않도록 제작되었다.

2.3. 전자빔 광학계

전자빔 광학계(beam transport line)는 bending magnet, solenoid magnet, corrector magnet, kicker magnet, beam current monitor, beam position monitor, dump 등으로 구성된다. Bending magnet는 plane edge를 가진 dipole magnet 형태를 가진다. Solenoid lens는 전자빔을 집속하는 역할을 하는데, 전자빔이 bending magnet를 통과하기 전에는 전자빔이 축방향 대칭성을 가지므로 quadrupole magnet를 사용하지 않고 solenoid magnets만을 사용하여 전자빔을 집속할 수 있다. Bending magnet를 지난 후에는 전자빔의 모양이 타원형이므로 solenoid lens 두 쌍과 quadrupole magnet를 사용하여 전자빔을 집속한다. Corrector는 지자기 (earth magnetic field)의 영향을 보정하는데, 사각의 틀에 네 가닥의 coil을 감았다.

전자빔 측정 시스템은 전자빔의 위치, 평균전류, 에너지, peak current, 펄스파형, 수평 및 수직 방향의 emittance, energy spread, 빔분포 등을 측정한다. 측정 장치로는 beam position monitor, DC current monitor, wide-band current monitor, beam measurement module (kicker, Al foil, quadrupole magnets)등이

있다.

전자총에서 발생된 전자빔이 포집기까지 전송되기까지는 buncher cavity, 빔 파이프, 고주파 가속관, 힘자석등을 통과하여야 한다. 이 전자빔을 손실없이 전송시키기 위해서 전자빔의 에너지 및 가속기의 각 구성요소의 특성에 맞게 전자빔 광학 요소들을 설치하였고 각 구성요소를 지나는 전자빔의 특성을 측정하기 위하여 전자빔 측정장치들을 제작하였다.

전자총에서 발생된 전자빔은 에너지가 약 300 keV인데 전류는 약 1.25 A이다. 이 전자빔은 공간전하효과에 의해 전자빔의 진해방향에 대해 횡방향으로 퍼지면서 전자빔의 질이 떨어지게 된다. 또한 전자빔이 buncher cavity를 지나면 전자빔의 첨두전류가 상승하게 되어 공간전하 효과가 훨씬 더 커지게 된다. 따라서 전자총에서 고주파 가속관 까지는 전자빔을 횡방향으로 집속시킬 수 있는 솔레노이드 자석이 각 위치에 따라 적절히 설치되어 있다. 이때 솔레노이드의 위치와 발생 자장은 전자빔 광학 계산 프로그램으로 설계되었고 발생자장은 변할 수 있게 제작되었다. 전자빔이 각 구성요소를 지날 때, 지자기장에 의한 전자빔의 drift 및 각 구성요소의 기계적인 설치오차등의 이유로 전자빔이 그 구성요소의 중심축상에 놓이지 않을 가능성이 많다. 이렇게 되면 전자빔의 질이 떨어질 가능성이 많다. 따라서 각 구성요소의 전단에는 전자빔의 횡방향 위치를 교정하는 편향 자석이 설치되어 있다. 한편 가속기 설치공간을 효율적으로 사용하기 위하여 고주파 가속관을 통과한 전자빔은 힘 자석에 의해 180°로 방향이 바뀌어 전자빔 포집기로 입사된다.

빔 라인에는 가속기의 각 구성요소를 지나는 전자빔의 기본변수를 측정할 수 있는 여러 가지 측정장치들이 설치되어 있다. 빔 파이프를 지나는 전자빔의 횡방향 위치를 측정할 수 있는 전자빔 위치 측정장치 4 set가 전자총 후단과 buncher cavity와 고주파 가속관 사이 및 힘 자석 전후단에 각각 설치되어 있다. 또한 전자총에서 발생된 전자빔과 포집기로 입사하는 전자빔의 평균전류를 측정할 수 있는 전자빔 평균전류 장치[10]가 전자총 후단과 포집기 전단에 각각 설치되어 있다. 이때 구 전류의 차가 50 μ A 보다 크면 컨트롤러에서 전자총 구동을 자동으로 정지시켜 가속기를 안정적으로 동작시킬 수 있게 하였다. 한편 buncher cavity를 지나면서 전자빔의 펄스폭이 줄어들면서 첨두전류가 증가하게 되는데, buncher cavity의 동작변수를 최적화하기 위하여 wall current monitor[11]를 전자총 후단과 buncher

cavity 후단에 각각 설치하였다. 뿐만 아니라 전자빔의 질 곧 에미턴스를 측정하기 위하여 사극 자석과 전자빔 형광판을 전자빔 포집기 전단에 설치하였다.

이렇게 설치된 전자빔 광학계와 전자빔 측정장치를 이용하여 전자총에서 발생된 전자빔을 95 % 이상 전송시킬 수 있었다. 이 때 전자총에서 발생된 전자빔의 첨두전류는 1.25 A이었고 buncher cavity를 통과한 뒤는 약 6 A로 상승하였다. 전자빔의 펄스폭은 전자총에서 약 1.6 ns이었고 buncher cavity를 통과하면서 약 350 ps로 줄어들었다. 가속기에서 최대로 얻은 전자빔 펄스의 반복율은 14 MHz이었다. 전자빔 광학요소들을 더욱 정밀 조정하여 광학계를 최적화시키면 전자빔 펄스폭을 설계상의 최대값인 22.5 MHz 까지 쉽게 얻을 수 있을 것이다.

2.4 RF 발생장치

Buncher cavity와 acceleration cavity에 RF를 공급하기 위한 RF 발생장치는 사극관 증폭장치로 이루어져 있다. 제작된 RF 발생장치의 외관은 그림 3과 같다. Buncher cavity용 RF 발생장치는 2 kW의 출력을 낼 수 있는 달단형 증폭기로 구성되어 있고, acceleration cavity용 RF 발생장치는 각각이 3단의 증폭기로 구성되어 있어 최종단의 출력이 130 kW가 된다. 최종 출력은 처음 입사되는 고주파의 세기에 의해서 결정되는데, 본 시스템에서는 RF cavity의 gap voltage와 coaxial feeder에서 공급되는 고주파 전류를 측정하여 amplifier에 입사되는 RF 출력을 조절하게 되어 있다. 이렇게 함으로써 RF 출력이 안정된 값을 가질 수 있도록 하였다.

각 증폭기의 이득은 고주파 출력부인 anode 공명회로의 가변 축전기에 의해서 공명 주파수를 변화시켜서 조절한다. 발생하는 대부분의 열은 사극관 tube를 통해서 냉각수로 제거한다. 그리고 이외의 비교적 낮은 열 발생부는 압축공기로서 식혀준다.

3. 결론

고출력 자유전자레이저 및 전자빔의 산업적 이용을 위한 대전류 전자빔 가속기를 개발하였다. 가속기에서 발생하는 전자빔의 최대 에너지는 2 MeV, 평균 전류는 50 mA이다. 가속기에서는 약 350 ps의 폭을 가진 펄스 형태로 인출하는데 전자빔의 반복율을 0 - 22.5 MHz로 조절함에 따라 평균 전류를 조절하게 되어

있다. 향후 이 가속기를 이용하여 고효율 밀리미터파 자유전자레이저를 개발할 예정이다. 전자빔 조사창을 설치하여 원자로 재료의 방사선 손상 (radiation damage) 연구 및 재료 특성 개선, 고효율 반도체 스위치 제작, 식품 및 의료기구 살균, 폐수 처리, 초전도체 및 기타 자성체 물질의 특성 개선 등에 활용할 예정이다.

참고문헌

- [1] V. L. Uvarov et al, Proc. of Particle accelerator, 3840 (1999).
- [2] K. Lin et al, Appl. Radiat. Isot, vol. 46, 1307 (1995).
- [3] Bernard Vere et al, U.S. Patent number 4,680,443 (1987)
- [4] Samuel V. Mablo et al, U.S. Patent number 4,652,763 (1987)
- [5] 방사선과 산업 No. 77 (1998).
- [6] E. Minehara et al, Proceedings of 19th International Conference on Free Electron Lasers, II-45, Elsevier, Amsterdam (1998).
- [7] S. V. Benson et al, Nuclear Instruments and Methods A 407, 401 (1998).
- [8] T. Nakamura et al, Journal of the Atomic Energy Society of Japan vol.32, no.6, 562 (1990).
- [9] S. Okuda et al, Nuclear Instruments and Methods A 358, 244 (1995).
- [10] AIP Conf. 212, Accelerator Instruments (1989).
- [11] Particles and Fields series 46, Accelerator Instruments (1991).

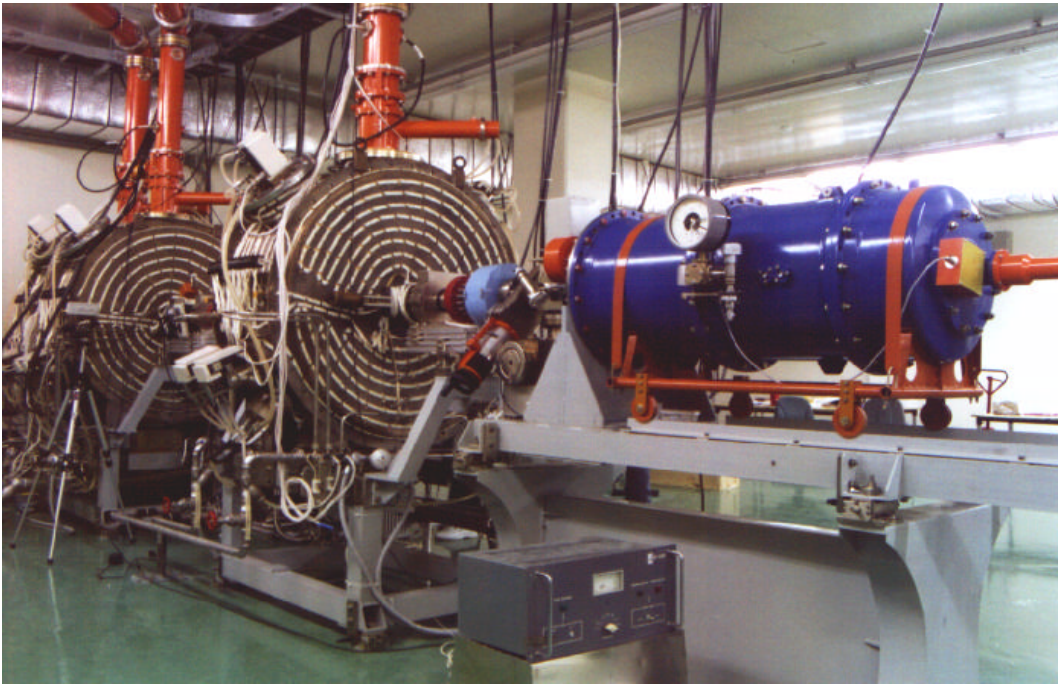


그림 1. 대전류 전자빔 가속기의 외관

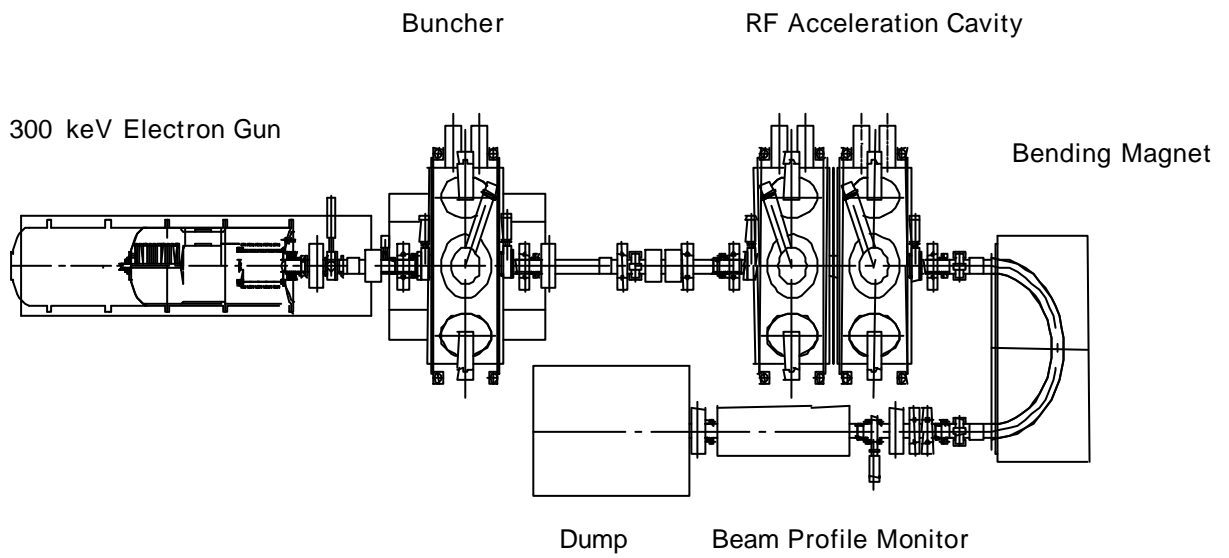


그림 2. 대전류 전자빔 가속기의 구성도



그림 3. RF 발생장치의 외관