

'99 추계 학술발표회 논문집

한국원자력학회

원자력 산업용 고출력 적외선 자유전자레이저 시스템 개념설계

**Conceptual Design of a High-power Infrared Free Electron Laser
for the Applications in Nuclear Industry**

이병철, 정영욱, 조성오, 김선국, 이종민

한국원자력연구소

대전광역시 유성우체국 사서함 105호

요약

자유전자레이저는 파장가변 범위가 넓고 고출력이 가능하기 때문에 원자력 산업 분야에서 중수생산 및 삼중수소 제거, 의료 및 산업용 동위원소 생산, 방사선 폐기물에서 장수명 핵종 군분리 및 유용원소 회수 등 많은 분야에 이용될 것으로 기대된다. 본 논문에서는 원자력 산업에 이용될 수 있는 고출력 적외선 자유전자레이저 시스템의 설계개념, 주요 구성요소 및 사양에 대해서 기술한다. 발진파장의 가변범위는 1-30 μm 이며, 평균출력은 10-100 kW이다. 전자빔 가속기로는 100 MeV급 고주파 가속기 시스템을 채택하였는데, recirculation 개념과 에너지회수 개념을 사용하여 소형화 및 고효율화가 가능하도록 하였다. 전자가속기, 광학공진기, 교번자장기 등 주요 sub-system의 사양에 대해서 논의한다.

Abstract

Free electron lasers are tuneable over a wide-range of spectrum, and can generate high average power of laser beam. The free electron lasers can be used in many fields of nuclear industry such as production of heavy water, extraction of tritium from heavy water, production of isotopes for medical and industrial applications, partitioning and extraction of valuable elements from nuclear waste, and so on. In this paper, the conceptual design of a high average power infrared free electron laser for the application in nuclear industry is described. The tunable range of output wavelength of the free electron laser is 1-30 μm , and the average power is 10-100 kW. A

100-MeV recirculating RF accelerator with energy recovery will be used as a driver of the free electron laser. Details of the electron accelerator, optical cavity, undulator, etc. are described in this paper.

I. 서론

자유전자레이저(FEL : Free Electron Laser)는 고에너지 전자빔이 주기적으로 방향이 바뀌는 자기장을 통과할 때 전자기파와의 공명적인 상호작용에 의해 결맞는 (coherent) 전자기파를 발생시키는 원리를 이용하여 고효율 레이저 빔을 얻는 장치이다[1-6]. 파장가변 범위가 대단히 넓으며 다른 레이저로는 얻을 수 없는 파장의 빛도 쉽게 얻을 수 있기 때문에 차세대 레이저로 각광받고 있다.

자유전자레이저의 가장 큰 장점은 넓은 범위에 걸쳐 연속적으로 파장을 변화시킬 수 있다는 점과, 다른 종류의 레이저로는 얻을 수 없는 임의의 파장도 쉽게 얻을 수 있다는 점이다. 다른 종류의 레이저는 원자 또는 분자의 에너지 준위가 변할 때 발생하는 빛을 이용하기 때문에 매질에 따라 고유한 주파수만을 낼 수 있으나 자유전자레이저는 전자빔의 에너지나 교번자장기 자장의 세기를 변화시킴으로써 넓은 영역에서 연속적으로 변화시킬 수 있다. 이러한 방법으로 얻을 수 있는 파장은 밀리미터파에서부터 X선까지 모든 스펙트럼 영역에 걸쳐 존재한다. 현재까지 개발된 자유전자레이저 중 가장 짧은 파장은 193 nm이고 가장 긴 파장은 15 mm이다[7]. 또한 미국 stanford 대학에서는 X선 영역의(1.5 ~ 2.5 Å) 자유전자레이저를 개발중이다 [8,9].

자유전자레이저는 원자력 산업, 의료, 국방, 화학공업, 물성연구 등 많은 분야에서 이용될 것으로 기대되고 있다. 원자력 산업에서는 방사성 폐기물 군분리 및 희귀 유용원소 자원화, 의료 및 산업용 안정동위원소 생산, 핵융합로 원료(D,T) 생산, 중수생산 및 삼중수소 제거, 원자력용 신소재 개발 등 많은 분야에서 응용될 것으로 기대되며, 특히 일본에서는 자유전자레이저 기술이 “원자력 분야의 4대 기반기술”중의 하나로 선정되어 집중적으로 연구되었다[10].

원자력 분야에서 자유전자레이저를 응용할 때는 주로 선택적 광화학반응 과정을 이용하는데, 다양한 종류의 원소 또는 동위원소가 섞여 있는 시료에 원하는 원소의 흡수 파장과 일치하는 파장을 갖는 레이저빔을 조사하여 선택적으로 여기시킴으로써 원하는 원소를 분리, 추출할 수 있다. 자유전자레이저는 넓은 범위에 걸쳐 파장을 변화시킬 수 있으므로

한 대의 시스템으로 다양한 종류의 원소를 분리할 수 있는 것이다.

원자로에서 발생하는 방사성폐기물에서 경제적으로 가치가 있는 원소들을 회수하여 자원화하는 과정에서 광화학반응을 이용하면 회수효율을 높일 수 있는데, 대상 원소가 다양하므로 넓은 범위에서 파장을 변화시킬 수 있는 자유전자레이저가 매우 유용할 것이다. 또, 사용후 핵연료에 포함되어 있는 초우라늄 원소는 반감기가 매우 길기 때문에 고에너지 입자빔을 조사하여 소멸처리함으로써 관리기간을 대폭 감소시킬 수 있는데, 그 전 단계로서 다양한 원소들을 특성에 따라 군분리(partitioning)해야 한다. 이 과정에서도 자유전자레이저를 이용한 광화학반응이 매우 유용할 것이다. 전기분해와 선택적 광여기를 이용하여 증수를 생산하거나 증수에서 삼중수소를 제거하는 연구도 진행중인데, 적외선 영역의 자유전자레이저가 가장 적합한 광원인 것으로 판단된다. 러시아의 부드커 핵물리연구소에서는 원자력 분야에의 응용을 위한 광화학반응 연구용으로 평균출력 100 kW 인 적외선 자유전자레이저를 개발중이다[11]. 또한, 고출력 밀리미터파 자유전자레이저는 핵융합로 플라즈마 가열 및 진단에 이용될 수 있는데, 네덜란드의 FOM 핵융합 연구소에서는 평균출력 1 MW인 밀리미터파 자유전자레이저를 개발하였다[12].

원자력 산업에서 요구되는 자유전자레이저의 평균출력은 수 십 kW이고 파장가변 범위는 원적외선-적외선 영역일 것으로 판단된다. 수 십 kW급의 자유전자레이저를 구동하려면 전자가속기의 평균전류가 수 십 mA급이 되어야하는데, 현재의 기술 수준으로 달성할 수 있는 한계치에 가까운 값이다. 또한 적외선 영역에서 넓은 파장영역을 cover하려면 전자빔의 에너지도 최대 100 MeV에 이르고 넓은 영역에서 손쉽게 변화시킬 수 있어야 한다. 본 연구에서는 파장가변 영역이 1-30 μm 이고 평균출력이 10 kW 이상인 자유전자레이저 시스템을 개념설계하였다. 전자가속기와 광학공진기, 그리고 교번자장기(undulator) 등 주요 핵심 요소의 사양을 정하고 전자빔의 궤적과 자유전자레이저의 출력을 simulation code를 이용하여 계산하였다.

II. 고출력 적외선 자유전자레이저 설계개념

자유전자레이저는 그림 1과 같이 전자빔 가속기, 교번자장기(undulator)라 불리는 주기적인 자기장 발생기, 그리고 공진거울 등으로 구성된다. 고에너지 전자빔이 교번자장기에 입사되면 주기적인 사행운동을 하면서 빛을 내는데, 그 중심파장은

$$\lambda_s = \frac{\lambda_u}{2\gamma^2} (1 + a_u^2) , \quad a_u = 0.935 B_u [T] \lambda_u [cm] \quad (1)$$

로 주어진다. 여기에서 λ_u 는 undulator의 주기이고 γ 는 전자의 상대론적 질량비이며 B_u 는 교번자장기의 주기이다. 처음에 전자빔이 교번자장기에 입사될 때는 전자빔의 공간적인 분포가 균일하지만 교번자장기 속을 진행하면서 전자빔과 빛과의 공명적인 상호작용에 의해 전자빔이 주기적으로 다발화(bunching)된다. 전자빔이 다발화 되면 각 전자에서 발생하는 빛의 위상이 모두 같고 세기가 전자빔의 개수의 제곱에 비례하여 세어진다. 대개의 경우 undulator의 주기가 수 cm이고 a_u^2 의 값은 0.1~0.5 정도이므로 자유전자레이저의 출력파장이 적외선영역(1~30 μm)이 되려면 전자빔의 에너지가 50~100 MeV 범위에서 변화시킬 수 있어야한다.

자유전자레이저에서 레이저빔의 세기는 전자빔의 에너지(E) 평균전류(I_{av}) 및 효율(η)로부터 구해진다. 즉,

$$P_{av} = \eta E I_{av} \quad (2)$$

로 주어진다. 자유전자레이저의 효율이 대개 1~2 %이므로 레이저빔의 평균출력이 100 kW급이 되려면 전자빔의 평균전류는 50 mA 이상이 되어야한다. 전자빔의 에너지가 100 MeV이고 평균전류가 50 mA이면 전자빔의 평균출력은 5 MW에 이르게 되는데, 가속관에서의 열손실과 고주파 발생장치의 효율을 고려하면 적어도 20 MW의 전력이 필요하게 되고 냉각 시스템도 거대해진다. 또한 전자빔 에너지의 1~2 %만이 빛 에너지로 전환되고 나머지가 dump에 버려지면 막대한 양의 폐열과 방사선이 발생하게 된다. 이러한 문제를 극복하기 위해 그림 2(a)와 같이 racetrack microtron 개념과 에너지회수 개념을 결합한 microtron recuperator 방법이 러시아 BINP, 일본 JAERI, 미국 Jefferson Lab, 등에서 사용되고 있다.

Racetrack microtron에서는 동일한 고주파 가속관을 반복 사용하면서 전자빔 에너지를 증가시키고 전자빔의 에너지에 따라서 다른 track을 지나가게 한다. 그러나 보통의 racetrack microtron에서는 최종 에너지를 얻은 다음에 전자빔을 사용하고 폐기하지만, microtron recuperator에서는 레이저빔으로 에너지를 방출한 전자빔을 고주파 가속관에 180도의 위상차이로 재 입사시켜서 에너지를 회수한다는 것이다. 사용했던 전자빔의 에너지는 고주파로 전환하여 전자빔을 가속하는데 사용하여 에너지 효율을 높일 수 있을

뿐만 아니라 전자빔 폐기시의 전자빔 에너지가 현격히 낮아지기 때문에 방사선의 위험도를 대폭 낮출 수 있는 장점이 있다. 이 시스템의 설계에서 중요한 것은 서로 다른 에너지를 가진 전자빔 다발(bunch)들이 고주파 가속관을 지날 때 서로 겹치지 않도록 광학계를 설계하는 것이다. 그림 2(b)에는 가속되는 전자빔 다발들과 감속되는 다발들의 위상관계를 도식적으로 나타내었다. 표 1에는 적외선 자유전자레이저 시스템의 주요 사양을 나타내었다.

III. 전자가속기 시스템 및 고주파 가속관

자유전자레이저용 전자가속기는 크게 초전도 가속기를 사용하는 시스템과 상전도 가속기를 사용하는 시스템으로 나눌 수 있다. 초전도 가속기를 사용하는 시스템은 가속시의 에너지 효율이 높은 장점이 있지만, 현재의 전자빔 제어기술로는 대출력의 전자빔이 가속관에서 가속 및 감속될 때 발생하는 작은 손실을 완전히 없애기 어렵다. 비록 작은 손실이라도 가속관 벽의 온도를 상승시켜 극저온의 유지가 불가능하게 되기 때문에 전자빔의 출력이 제한되고 이에 따라 레이저빔의 출력을 높일 수 없게 된다. 그리고 가속관 자체의 크기는 작지만 액체헬륨 온도로 냉각을 시키기 위한 주변 장치와 높은 정밀도의 전자빔 광학계가 필요하여 시스템의 크기가 커지고 비용이 높아지는 문제점이 발생한다. 상전도 가속관은 전자빔을 가속하기 위해 많은 전력을 필요로 한다는 단점이 있으나, 현실적으로 대전류 전자빔을 가속하기가 용이하고 전자빔 광학계가 간단해 지기 때문에 현재의 기술로는 보다 실용가능성이 높은 것으로 평가받고 있다. 본 연구에서는 상전도 가속관을 사용하는 에너지회수형 전자가속기를 채택하였다. 그 배경에는 상전도 가속기가 갖는 장점 외에도 본 연구팀이 개발 완료한 2 MeV급 대전류 전자빔 발생장치의 기술적인 연장선 속에서 핵심 요소기술의 기반이 이미 이루어져 있는 점을 고려한 것이다.

서로 다른 에너지를 가진 전자빔 다발들이 고주파 가속관에서 가속 및 감속될 때 발생할 수 있는 불안정성을 최소화하기 위해서는 서로 다른 에너지의 전자빔이 겹치지 않도록 하는 것이다. 이를 위해서는 각 궤도의 길이가 다음의 관계식을 만족해야된다. 즉,

$$L_m = (8n + m)\lambda_{RF} \quad (3)$$

여기에서 L_m 은 궤도의 길이, m 은 궤도 수, λ_{RF} 는 고주파의 주기이며, n 은 임의의 정수

이다. 첫 번째 궤도를 돌아서 가속관에 입사되는 전자빔은 처음 injector에서 입사되는 전자빔과 λ_{RF} 만큼 궤적 차이가 나게되므로 각 궤도를 돌고 가속관으로 들어오는 전자빔은 각 각 다른 고주파의 주기에서 가속된다. 한편 마지막 8 번째 궤도를 돌고 난 전자빔은 감속이 되어야 하므로 $\frac{1}{2}\lambda_{RF}$ 만큼의 위상차를 가져야 한다. 그래서 마지막 궤도의 길이는 다음과 같다.

$$L_8 = (8n + 8 + 0.5)\lambda_{RF} \quad (4)$$

본 연구에서는 임의의 정수 n 을 3으로 설계하였다.

그림 3에 본 연구에서 설계한 고효율 자유전자레이저 시스템을 나타내었다. 전자총에서 0.3 MeV의 에너지를 가진 전자빔이 발생되고 전단가속기를 거치면서 1.5 MeV의 에너지를 얻은 다음 8 개의 고주파 가속관으로 구성된 주가속단에 입사된다. 주가속기를 지난 전자빔은 편향자석 등의 전자빔 광학계를 지나 주가속관으로 되돌아와 다시 가속된다. 주가속기를 한 번 지날 때마다 12 MeV의 에너지를 얻고 이 과정을 8 번 반복하면서 약 96 MeV의 에너지를 얻는다. 이렇게 함으로써 적은 수의 가속관으로 높은 에너지를 얻을 수 있다. 전자빔이 교번자장기를 지나면서 운동에너지가 빛에너지로 변환되어 레이저 발진이 일어나게 된다. 발진에 사용된 전자빔은 편향자석 등을 지나 다시 고주파 가속관에 입사되는데, 이번에는 고주파의 위상이 180도 바뀌어 전자빔이 감속되게 되고 전자빔의 운동에너지는 고주파 에너지로 바뀌게 된다. 한 번 지날 때마다 약 12 MeV의 에너지를 잃고 이러한 과정이 반복되어 dump에 도달하는 전자빔은 입사에너지보다 약간 작은 에너지를 갖게된다. 이 과정에서 발생된 고주파 에너지는 다른 전자빔을 가속하는데 사용된다. 이와 같이 한 번 발진에 사용된 전자빔의 에너지를 회수하여 전자빔 가속에 사용함으로써 시스템의 효율이 크게 높아질 뿐만 아니라 dump에 버려지는 전자빔의 에너지가 작아져 폐열 및 방사선 발생량이 획기적으로 줄어든다.

광화학반응을 이용하여 선택적으로 특정 물질을 분리 추출하는 경우 레이저의 선폭이 각 물질의 흡수선 간격보다 좁아야 한다. 특히 동위원소와 같이 흡수선의 간격이 작은 경우에는 이러한 제약 조건은 더욱 엄밀해진다. 자유전자레이저의 최소 선폭은 전자빔의 펄스폭의 역수로 결정된다. 선택적 광이온화 실험이나 광화학반응에 의한 분리 추출에서는 수 십 GHz의 선폭이 요구되므로 전자빔의 펄스폭을 100 ps로 정하였다.

평균출력이 높은 자유전자레이저에서 대전류 전자빔을 손실이 적게 가속하기 위해서는

공진 주파수가 작은 가속관을 사용해야한다. 하지만, 공진 주파수가 작을수록 가속관의 크기가 커지고 이에 따라서 제작비용이 증가하므로 적당한 파라메타를 선택해야한다. 본 연구에서 사용한 고주파 가속관의 공진 주파수는 180 MHz이다. 고차 고조파의 발생을 적게 하기 위해서 기본모드가 TM_{010} 모드인 가속관 구조를 택하였다. 이 가속관은 반경이 650 mm이고 길이가 576 mm인 대칭형의 원통이고, 그 옆면은 80도 기울어진 원뿔대 모양 (conical shape)으로 되어 있는데, 그 이유는 외부 공기압에 견디도록 하게 함이다.

전자빔을 100 MeV로 가속하는데 필요한 고주파 발생장치의 총용량은 약 1060 kW이다. 동일한 고주파원에서 발생된 고주파는 5개의 출력 증폭단으로 나누어져 필요한 출력을 각 가속관에 공급된다. Injector의 buncher cavity는 전자빔의 펄스폭을 줄여주는 역할만을 하기 때문에 이 때 필요한 출력은 2 kW 정도로 비교적 낮다. Injector의 두 개의 가속관에는 각 각 80 kW의 고주파 출력이 필요하다. 주 가속기의 16 개의 가속관에는 총 900 kW의 고주파가 필요하며, 이는 2대의 450 kW 고주파 증폭기에서 공급한다.

III. 교번자장기 및 광학공진기

교번자장기(undulator)는 자석이 주기적으로 배열되어 있어 입사된 전자빔을 사행운동시킴으로써 전자빔의 운동에너지를 빛 에너지로 변환시키는 장치이다. 본 연구에서는 전자석과 영구자석을 결합한 hybrid형 교번자장기를 채택하였는데, 그 기본 구조를 그림 4에 나타내었다. 자기장의 주기는 35 mm이고, gap은 40 mm이다. 이 교번자장기에서는 전자석에 흐르는 전류를 변화시켜 자기장의 세기를 1.5~3 kG 범위에서 정밀하게 조정한다. 전자석의 전류에 따르는 자기장의 세기 변화를 그림 5에 나타내었다.

전자빔의 에너지 분산(energy spread)이 무한히 작을 때에는 교번자장기의 길이가 길어질수록 이득과 레이저 출력이 높아지지만, 전자빔의 에너지 분산이 커지면 레이저의 이득 및 출력에 한계가 있게 되어 교번자장기의 길이를 무작정 길게 하는 것이 도움이 되지 않는다. 전자빔의 에너지 분산이 유한할 경우 교번자장기의 최적 주기수는 다음 식으로 주어진다. 즉,

$$\frac{1}{2N_{\omega}} \approx \frac{\Delta E}{E} \quad (5)$$

전자빔의 에너지 분산이 약 1 %이므로 교번자장기의 최적 주기수는 100이 된다.

전자빔이 undulator를 지나면서 빛에너지가 발생된 만큼 전자빔의 운동에너지가 작아지고 이에 따라 자유전자레이저의 공진조건이 틀려지게 되면 gain이 포화되어 더 이상 에너지 변환이 일어나지 않는다. 그러면 레이저빔의 출력도 더 이상 커지지 않고 포화되어 에너지 변환 효율이 작게 된다. 에너지 변환 효율을 더 높이기 위해서 multi-stage oscillator 개념을 사용하였는데, 이 공진기는 그림 8과 같이 두 개 이상의 undulator와 광학공진기로 구성된다. 이 구조에서는 전자빔이 각 undulator를 통과하면서 에너지를 잃어 포화조건에 도달하더라도 다음 undulator에서는 공진조건이 새로이 만족되도록 각 각의 undulator의 세기를 조정한다. 예를 들어, 첫 번째 undulator에서 에너지가 감소하여 포화조건에 도달한 전자빔이 두 번째 undulator에 입사될 때에 그 에너지에 맞추어 공진조건이 만족되도록 두 번째 undulator의 자기장 세기를 첫 번째 undulator의 자기장 세기보다 1 % 정도 작게 조정한다. 각 각의 자기장 세기의 조절은 자유전자레이저 발진기 simulation을 통해서 각 undulator에서 전자빔의 에너지가 어떻게 변하는가를 조사하여 정해야한다. 또, 전자빔이 undulator를 지날 때 전자빔의 에너지 분산이 증가하여 gain이 감소하게 되므로 이것 역시 simulation을 통해서 조사하여야한다. 에너지 변환효율이 너무 높아서 전자빔의 에너지 변화가 너무 커지면 감속시에 전자빔이 유실될 수 있으므로 전자빔 광학계의 전자빔 에너지에 대한 acceptance도 고려해야한다. 다양한 파라메타의 자유전자레이저 발진기에 대하여 자유전자레이저빔의 출력을 계산한 결과, 발진기의 종류 및 교번자장기의 파라메타에 따라 10-100 kW의 평균출력을 얻을 수 있음을 알았다. 구체적인 시스템의 파라메타는 응용분야에 따라 알맞게 선택해야할 것이다.

IV. 결론

원자력 산업에서 이용될 수 있는 고효율 적외선 자유전자레이저를 설계하였다. 설계된 자유전자레이저의 파장가변 범위는 1-30 μm 이며, 평균출력은 10-100 kW이다. 전자빔 가속기로는 100 MeV급 고주파 가속기 시스템을 채택하였는데, recirculation 개념과 에너지 회수 개념을 사용하여 소형화 및 고효율화가 가능하도록 하였다. 영구자석과 전자석을 결합한 hybrid형 교번자장기 module을 사용하는 multi-stage oscillator를 채택하여 전자빔의 운동에너지에서 빛 에너지로의 변환효율을 높일 수 있도록 하였다.

참고문헌

- [1] "입문 자유전자레이저", 일본원자력학회, Tokyo (1995)
- [2] "자유전자레이저와 그 응용", 일본전기학회, Corona 사, Tokyo (1990).
- [3] T. V. Higgins, Laser Focus World, 113, May (1992).
- [4] H.P. Freund and T.M. Antonsen, "Principles of Free Electron Lasers", Chapman & Hall, London, (1992)
- [5] C. A. Brau, Free Electron Lasers, Academic Press Inc., New York (1990).
- [6] P. Luchini and H. Motz, "Undulators and Free-Electron Lasers", Clarendon Press, London (1990).
- [7] <http://www.fel.duke.edu/News/wavelengthrecord.html>
- [8] <http://www-ssrl.slac.stanford.edu/lcls/>
- [9] <http://www.desy.de/~wroblewt/scifel/scifel.html>
- [10] 원자력공업, Vol42, no9, pp. 54-76 (1996).
- [11] <http://www.inp.nsk.su/synfel/intro.html>
- [12] <http://www.rijnh.nl/DEPARTMENTS/LASER/FEM/fern.html>

표1. 고효율 적외선 자유전자레이저의 주요사항

레이저빔	파장	1~30 μm
	평균출력	10~100 kW
	펄스폭	100 ps
	반복률	22.5 MHz
전자빔	구조	에너지회수형 racetrack microtron
	에너지	50~100 MeV, 가변
	평균전류	50 mA
	RF 주파수	180 MHz
발진기 (undulator + 공진기)	발진기	Multi-stage, Electron Output
	Undulator 주기	35 mm
	Undulator gap	40 mm
	자기장 세기	1.5~3 kG, 가변

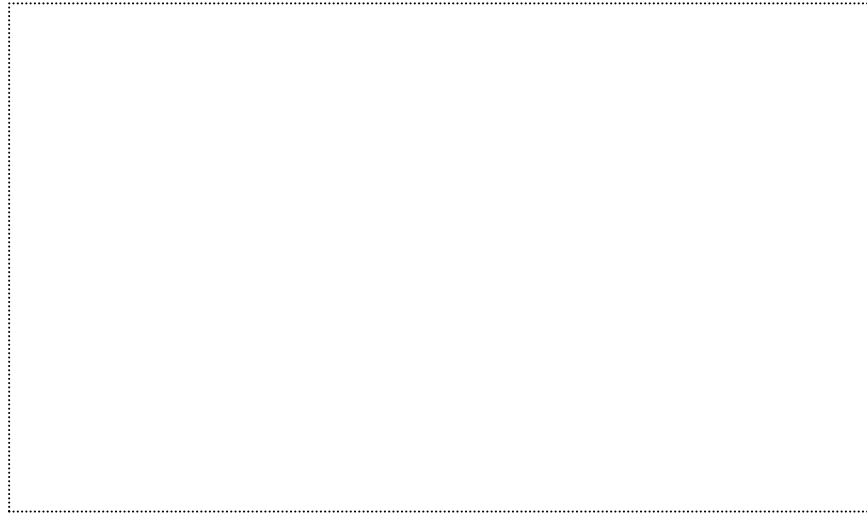
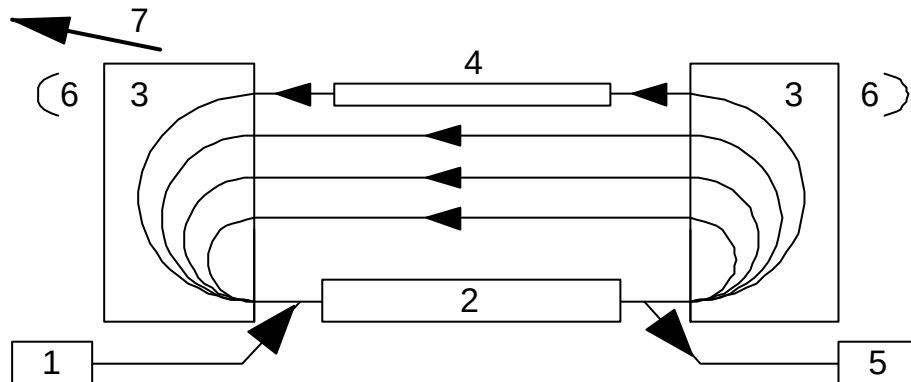
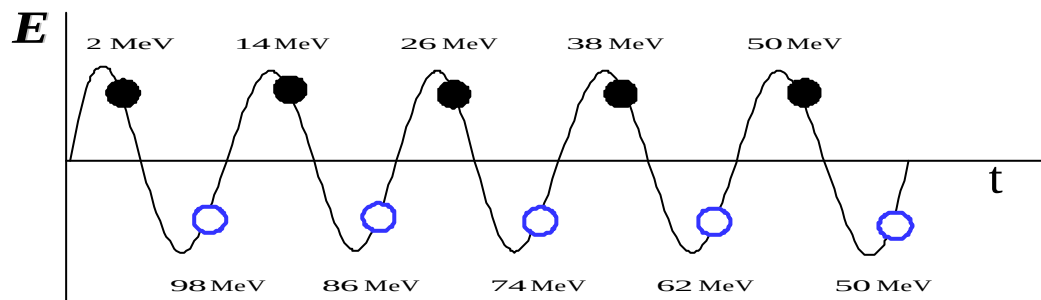


그림 1. 자유전자레이저의 구조 및 원리



(a)



● Acceleration ○ Deceleration

(b)

그림 2 (a) Microtron recuperator의 구조 1-인젝터, 2-RF cavity 구조, 3-180도 achromatic bends, 4-FEL 자석 시스템, 5-전자빔 덤프, 6-거울, 7-레이저빔.
(b) Microtron recuperator에서 전자빔 다발들의 위상관계

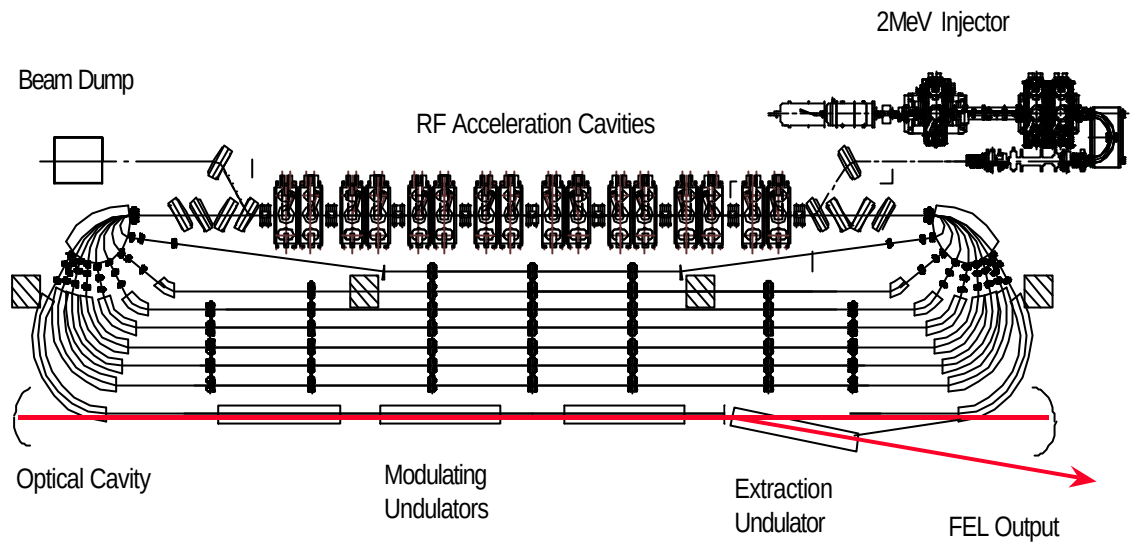


그림 3. 고효율 적외선 자유전자레이저 시스템 구성도

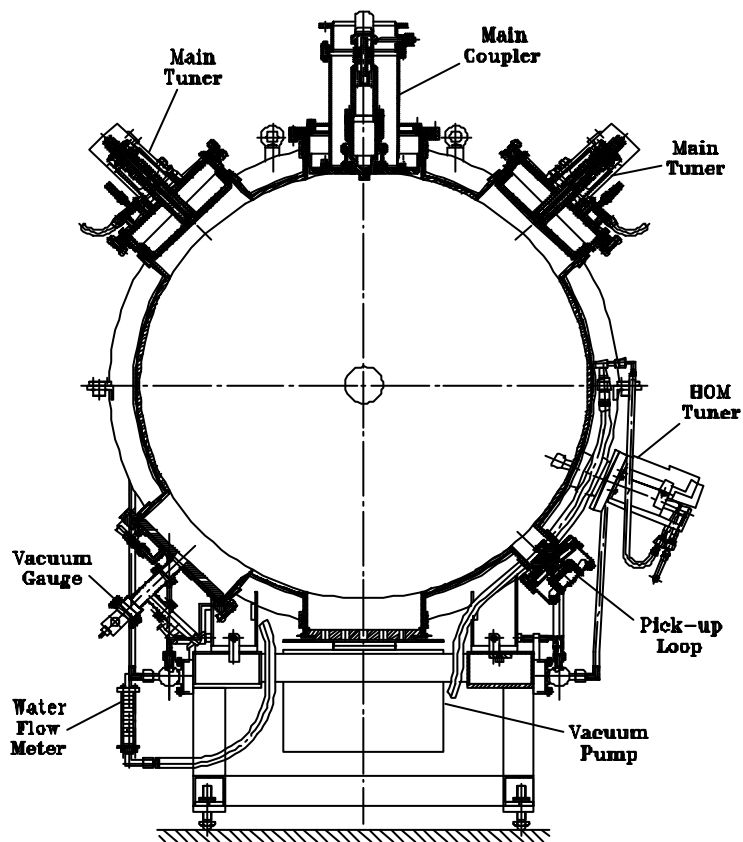


그림 4 고주파 가속관의 구조

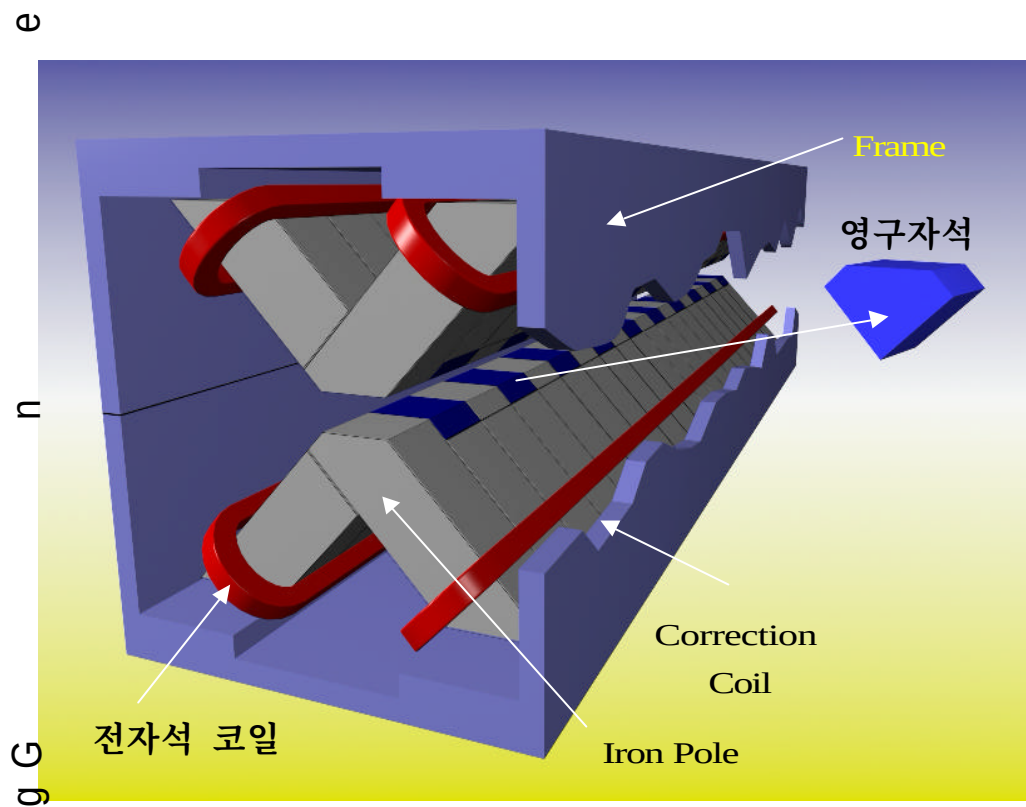


그림 5. Hybrid형 교변자장기(undulator)의 구조

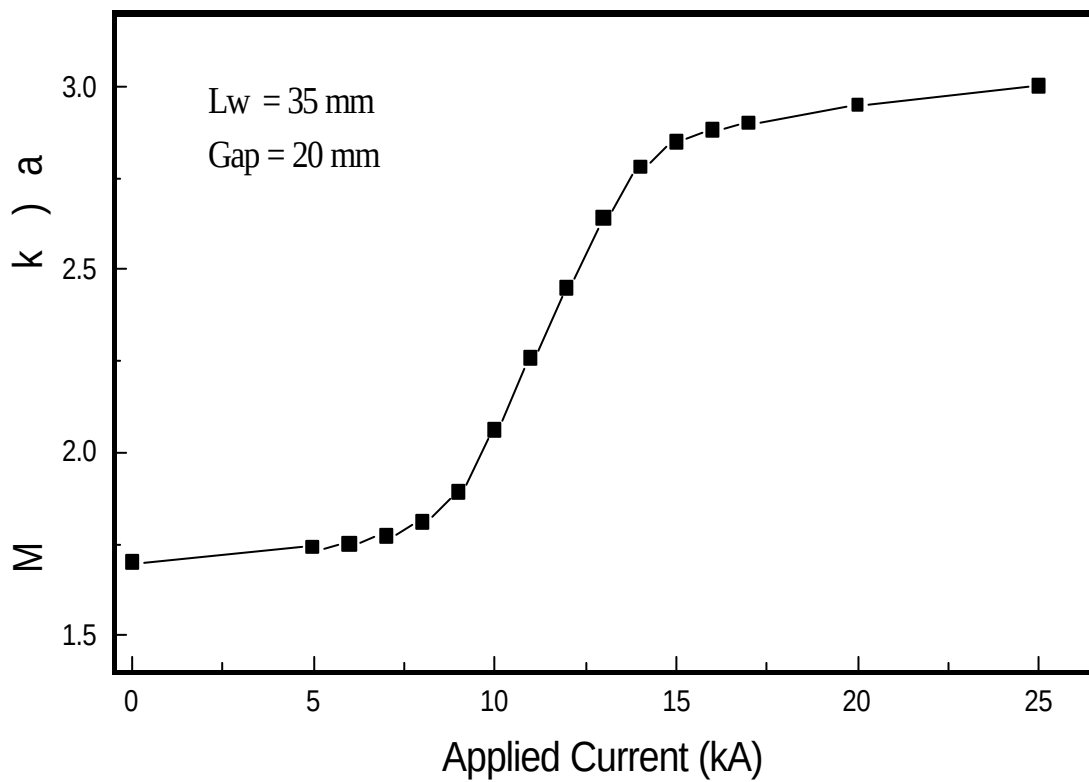


그림 6. 전자석의 전류에 따른 교변자장기의 자기장 세기