

0.45MeV 고주파 4중극자 cold model 시험

Cold Model Test of the 0.45MeV RFQ

김경신, 전상진, 한 장민, 조용섭, 최병호

한국원자력 연구소
대전시 유성구 덕진동 사서함 105

요 약

KOMAC(Korea Multipurpose Accelerator Complex) 첫 단계 사업의 일환으로 350MHz ,CW, proton beam을 방출하는 4-vane으로 구성된 0.45MeV Radio-Frequency Quadrupole (RFQ) 선형가속기가 제작중에 있다. 무산소동으로 제작하기에 앞서 vane의 형상 및 endplate size를 결정하고, RFQ의 각 구성 요소인 tuner, stabilizer rod의 효과 및 전기적 특성을 조사하기 위해 알루미늄 합금을 사용하여 cold model를 제작했다. 깊이가 4cm 파여져 있는 undercut에 conductor를 0.1cm씩 부착 시켰을 경우 공명 주파수가 선형적으로 증가한다. endplate는 vane 끝에서 3cm 이내에서는 공명 주파수의 변화가 심하지만 6.6cm 이상에서는 변화없이 일정하다. Tuner를 가지고 RFQ cavity에 4.5cm 까지 삽입했을 경우, 작동 모드인 quadrupole 모드(TEM₂₁₀)의 주파수를 약 1.88MHz 정도 조정 할 수 있다. Stabilizer rod는 dipole 모드를 quadrupole 모드로부터 shift 시키거나 dipole 모드의 세기를 감소시킨다.

Abstract

As the first stage accelerator of the KOMAC(Korea Multipurpose Accelerator Complex) 0.45MeV, 350MHz, CW Radio-Frequency Quadrupole (RFQ) will be built to produce proton beam. Vane shape and endplate size are decided by using a RFQ cold model with Al alloy before 0.45MeV RFQ with OFHC. To investigate the effect and electrical characteristics of tuner and stabilizer rod which are component of RFQ. As conducting materials increase by 0.1cm on undercut which has 4cm depth, a resonant frequency increase. When an endplate increases in the range of a vane end and 3cm, the resonant frequency rapidly varies, and in the range of 3cm and 6.5cm it smoothly varies, after 6.5cm it holds constant. As tuners insert to 4.5cm in the RFQ cavity, the resonant frequency of a quadrupole mode, TE₂₁₀, can control to 1.88MHz. Stabilizer rod shifts a dipole mode, TE_{11n}, from the quadrupole mode and decreases an amplitude of the dipole mode. n is a longitudinal mode number.

I. 서론

RFQ는 1970년대 Kapchinski와 Teplyakov에 의해 처음 제안된 선형 가속기이다[1]. RFQ는 RF-Electricfield를 이용하여 낮은 에너지 영역에서 효율적으로 고전류 빔뿐만 아니라 저전류 빔을 강한 집속, 변칭 그리고 가속을 동시에 시킬 수 있는 장치이다. 일반적인 선형가속기는 강한 집속보다는 가속 구조에 중점을 두고 있기 때문에 일반적인 가속기들은 잘 알려진 바와 같이 저속의 입자, 고전류 빔을 가속시키는데 제약을 받는다. 반면 RFQ는 강한 집속 혹은 수송 구조에 중점을 두고 있기 때문에 전자에 비해 상대적으로 질량이 큰 양성자나 우라늄과 같은 저속 입자의 가속에 많은 장점을 준다. 따라서 이런 문제점들을 RFQ를 통하여 잘 해결할 수 있으므로 RFQ는 최근 양성자 가속기의 제작에 있어 주로 사용되는 장치이다.

KAMAC(Korea Multipurpose Accelerator Complex) 첫 단계 사업의 일환으로 350MHz ,CW, proton beam을 방출하는 4-vane의 0.45MeV RFQ가 제작중에 있다[2]. 0.45MeV RFQ의 주요 parameter들은 아래 표에 보여준다.

표1) RFQ Parameters

PARAMETER	VALUE
Operating frequency	350 MHz
Particles	H ⁺
Input / Output Current	23 / 21 mA
Input / Output Energy	0.05 / 0.45 MeV
Input / Output Emittance	0.03 π -cm-mrad rms
Transmission	91 %
RFQ Structure Type	4-vane
Duty Factor	100 %
RF Power	112 kW
Length	106 cm

무산소동으로 0.45MeV RFQ를 제작하기에 앞서 vane의 형상 및 endplate size를 결정하고, RFQ의 각 구성 요소인 tuner, stabilizer rod의 효과 및 전기적 특성을 조사하기 위해 알루미늄 합금을 사용하여 cold model을 제작했다.

RFQ cavity의 전자기적 특성상 자기장의 분포는 vane 중심에서 RFQ cavity 벽 근처로 갈수록 자기장의 세기가 커지고 전기장의 세기가 작아진다. 이러한 RFQ cavity내의 field 분포를 고려해서 undercut, endplate, tuner를 사용해 공명 주파수의 변화를 보고, 공명 주파수 350MHz가 나올 수 있는 각 성분의 위치를 알아 보았다. 이것을 위해 첫번째 RFQ cavity내에서 quadrupole 모드(TE210)의 공명 주파수를 350MHz로 맞추기 위해 undercut의 깊이를 조절하며 실험하였고, 두번째 endplate의 간격을 결정하기 위해 endplate의 위치를 변화시키며 조사하였다. 마지막으로 vane의 형상, endplate의 size를 결정한 후에 무산소동으로 제작한 0.45MeV RFQ의 tuning을 위해 tuner를 이용해서

tuning 효과를 살펴보았다.

RFQ cavity에서는 빔의 진행을 방해하는 dipole 모드(TE_{11n})가 quadrupole 모드(TE_{21n}) 근처에 생성된다. 따라서 빔의 원활한 진행을 위해 RFQ cavity는 dipole 모드를 소멸시키거나 quadrupole 모드에 영향을 주지 않도록 충분히 이동을 시켜 field를 안정화시켜야 한다. RFQ cavity내의 field를 안정화시키는 방법은 stabilizer rod, Two-loop stabilizer, VCR(vane coupling ring) 등이 있다. Two-loop stabilizer는 vane 안에 파장의 길이에 해당하는 loop를 집어넣어 field를 안정화시키는 방식이고, VCR은 서로 반대 vane들을 연결시켜서 전압 차이를 없게 해서 dipole 모드를 제거하는 방식이다. 빔이 CW 방식에서는 반대 vane들이 등가 전압이 되는 시간동안 열이 많이 발생하므로 적합하지 않다. 0.45MeV RFQ cold model는 이 방법들 가운데 구조도 간단하고 제작도 용이한 stabilizer rod를 사용해서 시험하였다. Stabilizer rod를 dipole 모드가 형성되는 vane 사이에 삽입해서 dipole 모드를 이동시키거나 소멸시키는 방식이다.

II 실험

그림 1은 알루미늄 합금을 사용해서 만든 0.45MeV RFQ의 cold model을 보여준다. 길이는 106cm이고, tuner에 의한 효과를 보기 위해 cavity wall에 직경 5cm인 구멍을 20개 뚫었고, endplate와 stabilizer rod 효과를 조사하기 위해 endplate를 축 방향으로 움직일 수 있게 가공하였고, endplate 덮개에 stabilizer rod, 길이 30cm, 직경 1cm,를 위한 구멍을 뚫어 놓았다. Cavity의 전기적 특성을 살펴보기 위해 endplate 덮개에 bead 시험용 구멍을 뚫어 놓았다. 350MHz를 갖는 Vane의 형상을 결정하기 위해 Vane 양 끝에 undercut을 4cm 깊이로 가공하였다. Vane tip과 냉각수로 가공은 하지 않았다. 제작된 cold model은 알루미늄 합금을 사용했기 때문에 온도에 따라 매우 민감하므로 실험을 25-26 °C의 온도에서 수행하였고, 측정된 Q



그림 1. RFQ cold model

값은 4000정도이다 (Superfish에 의한 설계값 $Q=8500$).

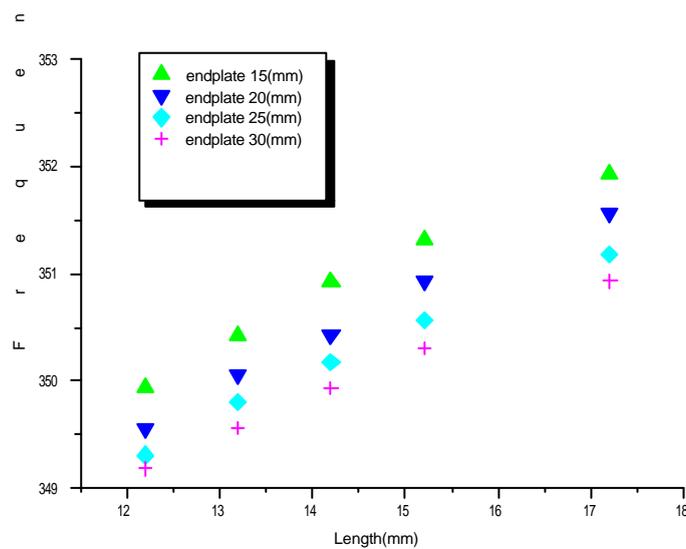
RFQ cavity의 특성을 조사하기 위해 network analyzer(HP4396A)로 낮은 출력의 rf를 RFQ cold model에 공급하면서 실험을 했다. RFQ는 vane이 4개인 관계로 이들 vane에 의해 구분된 4개의 cavity로 이루어져 있다. 4군데의 cavity 모두 생성되는 모드의 주파수와 field의 세기가 동일함을 확인했기 때문에 앞으로 수행될 실험에서는 모두 낮은 출력의 rf를 그림 1의 정면에 보이는 rf-drive loop를 통해 공급했다.

RFQ cavity의 특성을 조사하기 위해, 첫번째는 endplate를 고정 시켜놓고, tuner는 RFQ cavity 내부의 벽 표면까지만 삽입한 다음 4cm의 깊이가 파여져 있는 undercut에 conductor를 1mm씩 부착시키면서 실험을 했다. 두번째는 undercut의 깊이를 고정시켜놓고, 역시 tuner는 cavity 내부의 벽 표면까지만 삽입한 후 endplate를 vane에서부터 0.5cm씩 떨어뜨리면서 실험을 했다. 세번째는 endplate를 vane에서부터 7.7cm 떨어뜨려 놓고, undercut에 conducting 재질을 1.72cm 붙여서 350MHz 보다 조금 높게 한 다음 지름이 5cm이고 원기둥 모양으로 제작한 tuner를 이용하여 0.5cm씩 RFQ cavity에 삽입하면서 실험을 했다. 네번째는 endplate를 고정시키고 tuner는 위에서 처럼 cavity 내부의 벽 표면까지만 삽입한 후 지름이 1.0cm이고 원기둥 모양인 stabilizer rod를 vane 중심에서 4cm 떨어진 곳에 삽입해서 dipole 모드가 shift되는지 소멸되는지를 실험하였다.

III 결과 및 고찰

≥

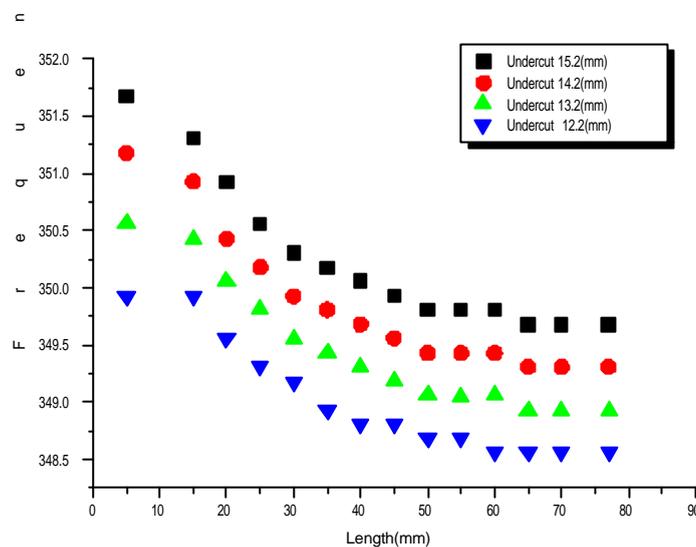
그림 2는 endplate를 vane 끝에서부터 15mm에 놓고 undercut의 길이변화에 따른 주파수를 알아본 다음, vane에서 멀어지는 쪽으로 5mm씩 증가시키면서 본 공명 주파수의 변화이다. Undercut 길이 변화는 1mm씩 증가 시켰다. undercut 길이변화에 따른 주파수의



2) Undercut

변화가 endplate에 관계없이 선형적으로 증가했다. RFQ cavity내의 magnetic field 에너지가 감소한 것은 회로 이론에서 RFQ cavity의 인덕턴스가 감소한 것에 해당된다. Undercut 영역은 자기장이 매우 세고 전기장이 약한 영역이어서 conducting material를 더하는 것은 cavity내의 magnetic field 에너지를 감소시키고 electric field 에너지에는 거의 영향을 주지 않는다. 회로 이론에서 이것은 cavity의 캐패시턴스의 변화가 없고 인덕턴스가 줄어드는 것에 해당한다. 따라서 undercut을 삽입할 경우 인덕턴스가 감소하므로 결과적으로 공명주파수는 증가하게 된다[3].

그림 3은 undercut을 고정시켜 놓고 endplate 길이변화에 따른 주파수의 변화이다. endplate가 vane 끝에서 30mm 이내에서는 주파수의 변화가 심하고, 65mm 이상에서는 주파수가 일정하고 350MHz의 공명 주파수가 약 20mm-50mm 사이에서 나옴을 보여준다.

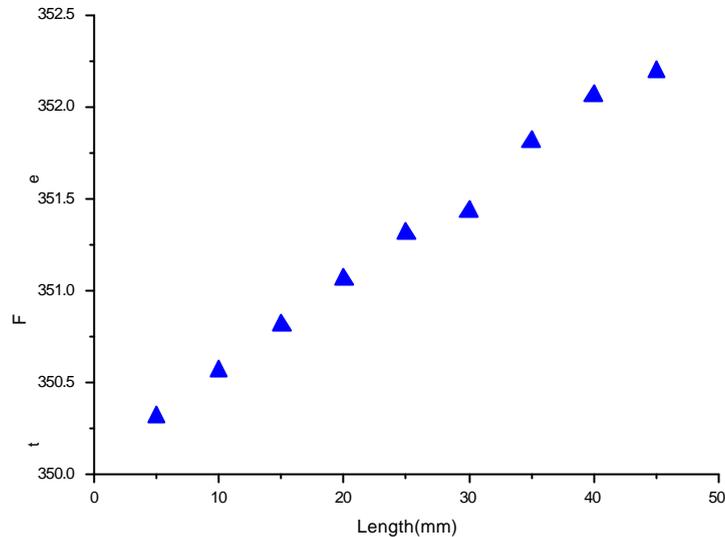


3) Endplate

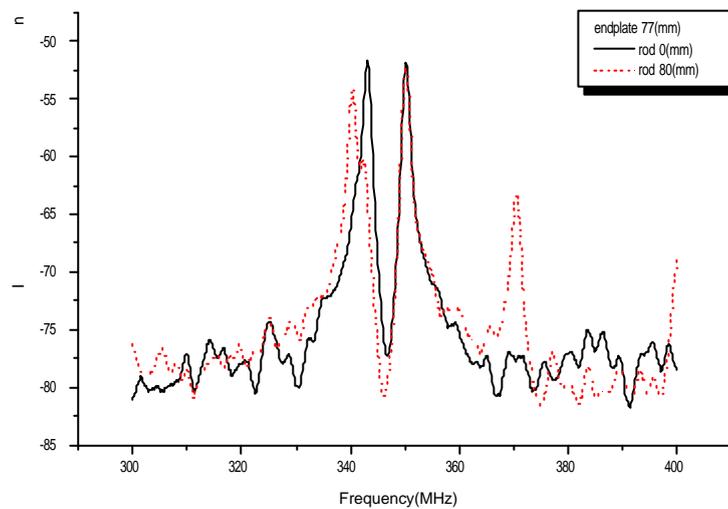
그림 4는 tuner의 삽입 깊이 변화에 따른 주파수 변화이다. 5mm씩 tuner를 RFQ cavity 안에 삽입 할 때 주파수가 undercut 효과의 결과와 같이 거의 선형적 증가했다. RFQ cavity wall 근처는 자기장이 세고 전기장은 매우 약한 영역이다. 따라서 위에서 언급한 것처럼 회로 이론에서 볼 때 RFQ cavity내에 tuner의 삽입 깊이가 증가할수록 인덕턴스가 감소하므로 주파수는 증가한다. 또한 가공한 tuner를 가지고 45mm까지 삽입했을 경우 약 1.88MHz 정도 주파수를 조정 할 수 있었다.

그림 5와 6은 stabilizer rod를 RFQ vane 중심에서 40mm 떨어진 곳에 삽입함으로써 dipole 모드의 shift와 소멸을 본 것이다. 그림 5)는 endplate를 vane 끝에서 77mm 떨어 뜨려 놓고 측정한 것이다. 그림 5)에서 알 수 있듯이 dipole 모드가 왼쪽으로 이동하고, higher 모드가 생성된다. 그림 6)은 endplate를 vane 끝에서 55mm 떨어뜨려 놓고 측정 한 것이다. 그림 6)에서 알 수 있듯이 RFQ안에 rod를 삽입 할 경우 dipole 모드가 소멸 된다. 따라서 그림 5)과 그림 6)에서와 같이 rod를 삽입 할 경우 endplate의 위치에 따라

dipole 모드가 shift 되거나 소멸되었다.



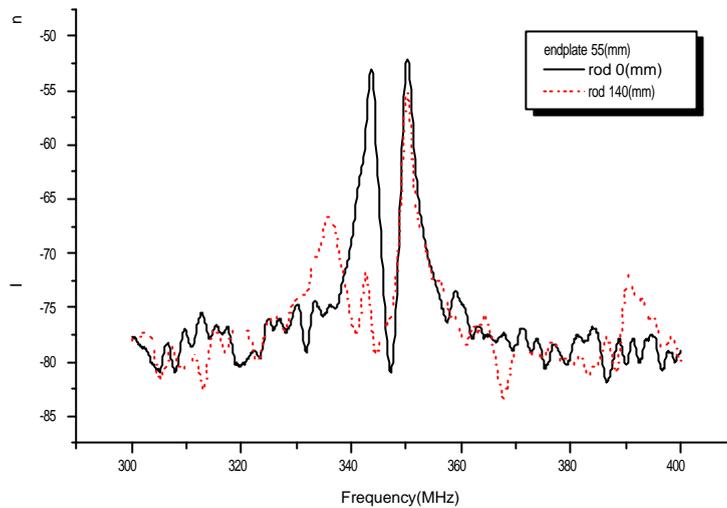
4) Tunner



5) Rod RFQ

IV 결론

양성자빔을 0.45MeV 까지 가속시킬 수 있는 350MHz, CW RFQ 선형가속기의 본 제품 제작에 앞서 알루미늄합금을 사용해 RFQ cold model을 제작한 후 RFQ cavity 특성을 조사하였다. 실험 결과로부터 Undercut의 깊이를 2.4cm로 했을 때 RFQ cavity내에서 quadrupole mode(TE210)의 공명 주파수가 설계값인 350MHz와 일치함을 볼 수 있었다. 깊이가 40mm 파여져 있는 undercut에 conductor를 1mm씩 부착 시켰을 경우, 주파수가



6) Rod RFQ

선형적으로 증가함을 볼 수 있었다. Endplate를 이용한 실험으로부터 endplate를 vane에 가깝게 놓은 경우 주파수의 변화가 심하게 발생함을 볼 수 있었고, 특히 dipole mode의 세기가 급격히 감소함을 볼 수 있었다. Endplate가 vane으로부터 6.6cm 이상 떨어지는 경우, 주파수의 변화가 거의 없음을 볼 수 있었고, 일반적으로 vane으로부터 멀어짐에 따라 주파수가 감소함을 볼 수 있었다. 제작한 tuner를 이용해서 공명 주파수를 약 1.88MHz정도까지 tuning 할 수 있었다. RFQ cavity에서 field를 안정화 시키기 위해 stabilizer rod를 삽입 할 경우 endplate의 위치에 따라 dipole 모드가 공명 주파수로부터 shift되거나 소멸됨을 볼 수 있었다.

참고 문헌

- [1]. I.M. Kapchinskii and V.A. Teplyakov, Prib. Tekh. Eksp., No. 2, 19 (1970).
- [2]. " 양성자 가속기 기본설계 연구", KAERI/RR-1769/96, 과학기술처, (1996).
- [3]. Thomas P. Wangler, Principles of RF Linear Accelerators (1998).