

2001 춘계학술발표회 논문집
한국원자력 학회

0.45MeV 고주파사중극자 선형가속기를 위한 동축형 고주파 결합기 설계

Design of the Coaxial Type RF Coupler for the 0.45MeV Radio-Frequency Quadrupole Linac

한장민, 이호행, 조용섭, 최병호

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 사서함 105호

배영순

포항공대
경상북도 포항시 효자동

요 약

다목적 대전류 양성자 가속기 시험 시설용 (KOMAC Test Facility) 고주파 사중극자 선형가속기는 20mA 양성자빔을 50keV로부터 0.45MeV 까지 가속시키기 위해 각각 350MHz, 0.12MW의 고주파 전력 입력을 필요로 한다. 고주파 사중극자 가속관에 고주파 전력을 최적으로 인가시키기 위해 저손실 송전을 할 수 있는 동축형 고주파 결합기를 설계하였다. 설계된 고주파 결합기의 반사계수는 350MHz에서 0.008이고 정재파비는 1.02:1이다.

Abstract

The KTF (KOMAC Test Facility) RFQ (Radio Frequency Quadrupole) linear accelerator that will accelerate a 20mA proton beam from 50KeV to 0.45MeV has an RF power input of 350MHz, 0.12MW. The coaxial type RF coupler which give a low-loss transmission is designed to couple the RF power to the RFQ accelerating cavity. A S-parameter calculated is 0.008 and VSWR (Voltage Standing Wave Ratio) is 1.02:1 at 350MHz.

I. 서론

0.45MeV, 350MHz 고주파 사중극자 선형 가속기(RFQ)는 KOMAC 과제에서 [1,2] 수행중인 3.0MeV 고주파 사중극자 선형 가속기의 제작특성을 시험하기 위해 만들어진 것으로 20mA의 양성자빔을 50keV로부터 0.45MeV 까지 가속시킬 수 있다. [3-5] 2개의 고주파 구동 루우프를 갖는 0.45MeV 고주파 사중극자 선형 가속기는 양성자빔을 가속시키기 위한 0.12MW의 전력을 3.0MeV 고주파 사중극자 선형 가속기에 사용 예정인 350MHz, 1.0MW 클라이스트론으로부터 공급받는다.

고주파 사중극자 선형 가속기에 사용되는 고주파 결합기(Coupler)는 일반적으로 높은 전력인 경우 조리개 (Iris) 형을 쓰고, 낮은 전력인 경우 동축(Coaxial)형을 사용한다. 0.45MeV 고주파 사중극자 선형 가속기의 경우 1개의 고주파 구동 루우프당 60kW를 필요로 하기 때문에 상대적으로 낮은 전력이다. 따라서 동축형 고주파 결합기를 고려하였다. 즉, 동축선로의 끝부분 루우프 안테나를 연결한 형태이다. 0.45MeV 고주파 사중극자 선형 가속기에 적합한 고주파 결합기의 설계에 있어 중요한 사항은 고주파 사중극자 선형 가속기 가속관과 고주파 결합기의 임피던스 결합이다. 즉, 입력 고주파 결합기를 통한 350MHz 고주파의 저손실 전송을 갖는 형상을 찾기 위해 S-인자값을 계산하였다. 이것을 위해 HFSS (High Frequency Structure Simulator) 코드를 사용하였다.

II. 고주파 결합기 설계

그림 1은 305MHz 고주파 사중극자 선형 가속기에 사용될 입력 고주파 결합기의 형상을 보여준다. 고주파 결합기는 장방형 도파관과 루우프 안테나를 갖는 동축선로로 구성되어 있다.

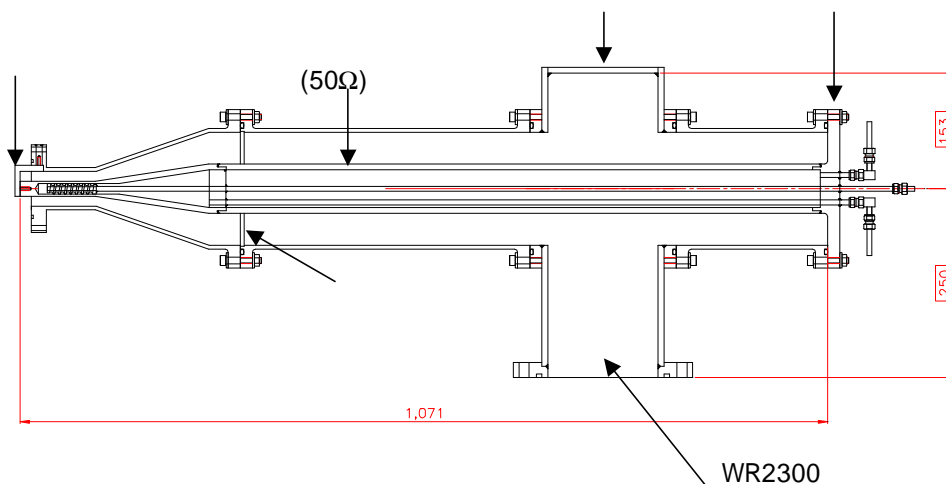


그림 1. 고주파 사중극자 선형가속기를 위한 동축형 고주파 결합기.

장방형 도파관은 가로 584.2mm, 세로 146.05mm의 WR2300이고, 스테인레스에 은도금을 하였으며, 운전시 진공을 유지한다. 장방형 도파관은 진공쪽 도파관의 고주파 창에 연결된다. 고주파 창의 공기 부분은 클라이스트론과 연결된다. 동축선로의 특성 임피던스는 전체적으로 50Ω이 되도록 설계하였다. 동축선로의 내부 도체의 축방향 지지를 위해 중간에 구멍이 뚫린 두께 7mm, 98% 고순도 알루미늄 세라믹 지지판을 설치하였다. 루우프 안테나는 가속관 표면으로부터 15mm에 위치하며 가속관 안에 고주파 전력을 공급하는 역할을 한다. 동축선로의 내부 도체안에는 냉각수로가 설치되어 있다. 냉각수의 입력단 최대 온도는 섭씨 30도이고, 압력은 최대 0.1기압이다. 동축선로와 장방형 도파관 내의 진공도는 클라이스트론 가동시 10⁻⁶ Torr 이하이고, 미가동시 10⁻⁷ Torr 이하이다. 고주파장의 침투에 의해 발생된 고주파 전류가 흐르는 동축선로 부분은 무산소동으로 제작한다. 결합 플랜지 위에 고주파 전류 흐름을 방지하기 위해 연결 부위에 Helicoflex RF Contactor를 사용한다.

동축선로의 설계시 주의할 사항은 가속관 공급하는 전력량이 동축선로의 주파수 대비 전력 수용 용량에 알맞도록 해야하는 점이다. 일반적으로 동축선로에서 최대 침투 전력용량은 다음 식에 의해 주어진다.

$$P_{\max} = 5.8 \times 10^{12} \left(\frac{E_d}{f_{\max}} \right)^2 \quad (1)$$

여기서 E_d 는 1기압 상온에서 전압방전이 일어나는 전기장으로 약 3x 10⁶ V/m 이고, f_{max} 는 설계된 동축선로의 최대 동작 주파수이다. 고차모드가 없을 경우, 350MHz에서 동축선로의 최대 침투 전력용량은 루우프 안테나 쪽에서 400MW 이고 도파관 쪽에서 1200MW이다. 고주파 사중극자 가속관에 공급되는 전력량은 0.12MW로서 전압방전을 일으키는 최대 전력 수용 용량보다 적음을 보여준다.

350MHz 고주파의 최저손실 송진 즉, 최대 전력 전달을 갖는 고주파 결합기를 설계하기 위하여, 장방형 도파관의 단락판과 동축선로의 단락판의 위치를 각각 변화시켜 보았다. 그림 2와 3에서 Y축은 반사손실로서 다음 식에 의해 주어진다.

$$RL = 20 \log |\Gamma| \text{ dB} \quad (2)$$

여기서 Γ 는 반사파 전압의 진폭을 입사파 전압의 진폭에 대해서 정규화한 전압 반사 계수이다.

$$\Gamma = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \quad (3)$$

여기서 Z_L은 고주파 입력 결합기의 부하 임피던스이고, Z₀는 특성 임피던스이다. 한편, 전압 정재파비는 다음과 같이 주어진다.

$$VSWR = \frac{V_{\max}}{V_{\min}} = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} \quad (4)$$

일반적으로 최저 반사 손실을 갖는 도파관 단락판의 위치는 $\lambda/4$ 에 존재한다. 즉, 350MHz의 경우 동축선로의 축 중심으로부터 위쪽으로 214mm 떨어진 곳에 위치한다. 그러나 고주파 결합기 동축선로 내부도체의 외경 크기 변화에 따라 동축선로와 도파관과의 결합 특성이 변함으로 최저 반사 손실을 고주파 결합기를 설계하기 위하여 정확한 도파관 단락판의 위치를 찾는 것은 중요하다. 그림 2는 장방형 도파관 단락판의 위치를 변화시킬 때 고주파 결합기 내의 주파수와 반사손실의 관계를 보여준다. 도파관 단락판의 위치가 동축선로 중심축으로부터 멀어짐에 따라 최저 반사 손실을 갖는 주파수값이 감소함을 보여준다. 그림 2로부터 고주파 가속관의 운전 모드 주파수에 해당하는 350MHz에서 최저 반사손실을 갖는 도파관 단락판의 위치는 동축선로의 축 중심으로부터 153mm 위쪽에 존재함을 알 수 있다. 이 경우 전압 반사 계수는 0.0045이고, 전압 정재파비는 식 (4)로부터 1.01 : 1 이다.

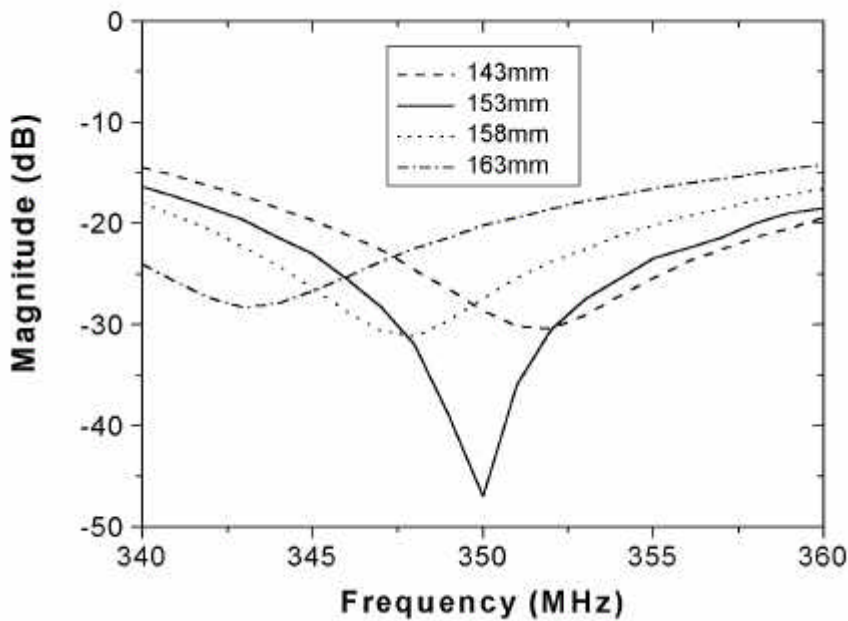


그림 2. 장방형 도파관 단락판의 위치 변화에 따른 고주파 결합기 주파수와 반사손실의 변화.

한편, 장방형 도파관의 기본 모드 TE₁₀ 으로부터 동축선로의 기본모드인 TEM 모드로의 전이 과정에서 최대 전력 전달을 할 수 있도록 하기 위한 또 하나의 인자는 동축선로 단락판의 위치이다. 그림 3은 동축선로 단락판의 위치를 변화시킬 때 고주파 결합기 내의 주파수와 반사손실의 관계를 보여준다. 동축선로 단락판의 위치가 그림 1의 도파관 왼쪽 벽으로부터 멀어짐에 따라 최저 반사손실을 갖는 주파수값이 감소함을 보여준다. 그림 3으로부터 고주파 가속관의 운전 모우드 주파수에 해당하는 350MHz에서 최저 반사손실을 갖는 동축선로 단락판의 위치는 도파관 왼쪽벽 으로부터 371mm 위쪽에 존재함을 보여준다. 이 경우 도파관 단락판은 동축선로의 축 중심으로부터

터 153mm 위쪽에 위치한다.

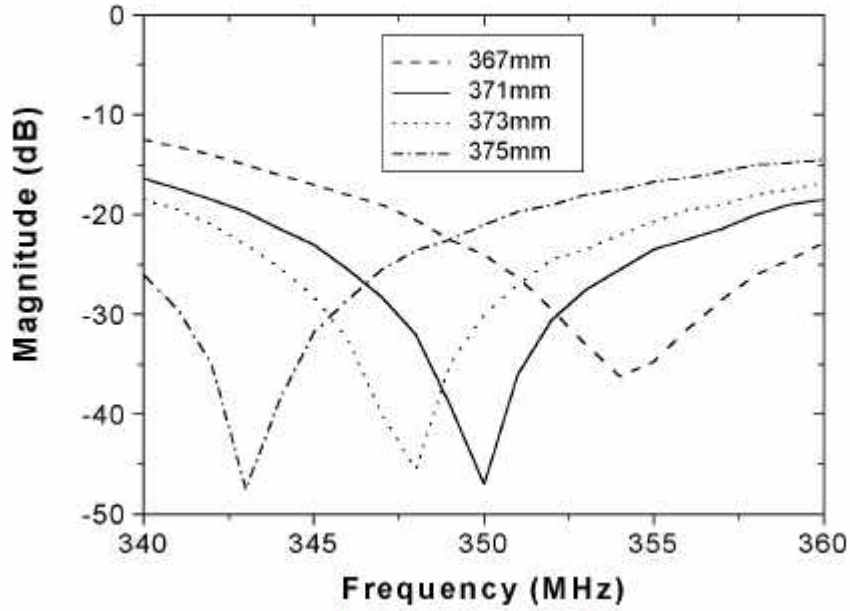


그림 3. 동축선로 단락판의 위치 변화에 따른 고주파 결합기 주파수와 반사손실의 변화.

그림 4와 5는 루우프 안테나를 갖지 않는 경우에 장방향 도파관과 동축선로 상의 전기장 분포를 보여준다. 입력 전력은 1Watt로 놓았고, 전기장의 단위는 V/m이다.

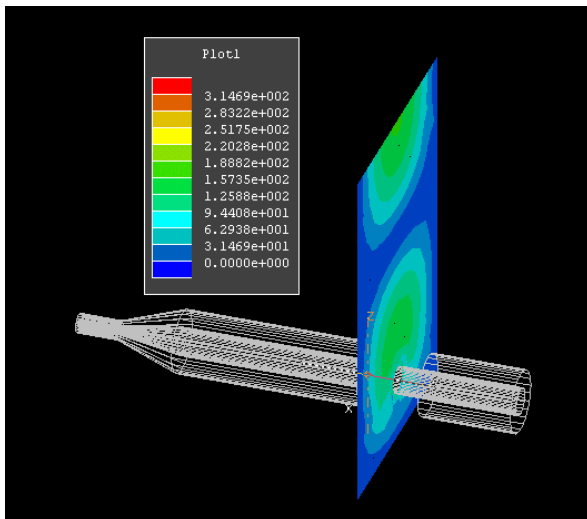


그림 4. 장방향 도파관 내의 전기장 분포.

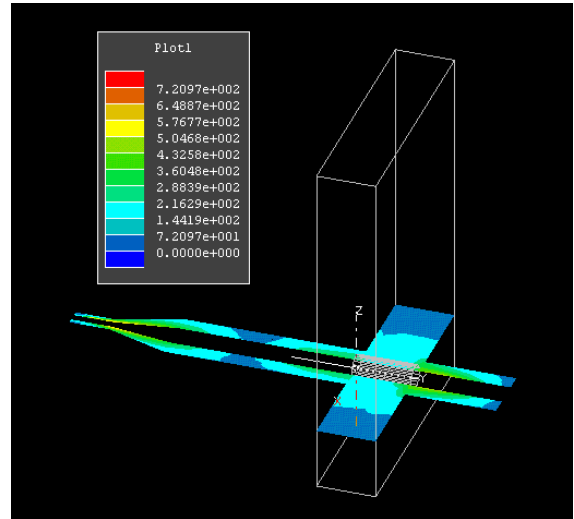


그림 5. 동축선로 내의 전기장 분포.

그림 4는 도파관 중심축을 따라 진행하는 TE₁₀ 모드를 보여준다. 여기서 사용된 장방형 도파관 WR2300의 전압 반사 계수는 0.0008이고, 전압 정재파비는 식 (4)로부터 1.002 : 1이다.

그림 6은 고주파 사중극자 가속관과 루우프 안테나를 갖는 경우에 장방형 도파관과 동축선로 상의 전기장 분포를 보여준다. 입력 전력은 1Watt로 놓았고, 전기장의 단위는 V/m이다. 가속관의 Q값이 최대가 되도록 하기 위해 동축선로의 끝 부분에 고정된 루우프 안테나 방향은 가속관의 축 방향에 수직이 되게 하였다. 그림 6의 고주파 사중극자 가속관에 분포하는 전기장은 루우프 안테나에 의해 만들어진 자기장으로부터 유도된 TE 모드를 보여주는 것이다. 고주파 사중극자 가속기의 운전 모드는 TE₂₁₀ 모드이다. 이 경우 고주파 사중극자 가속관과 정합된 고주파 입력 결합기의 전압 반사 계수는 0.01이고, 전압 정재파비는 식 (4)로부터 1.02 : 1 이다.

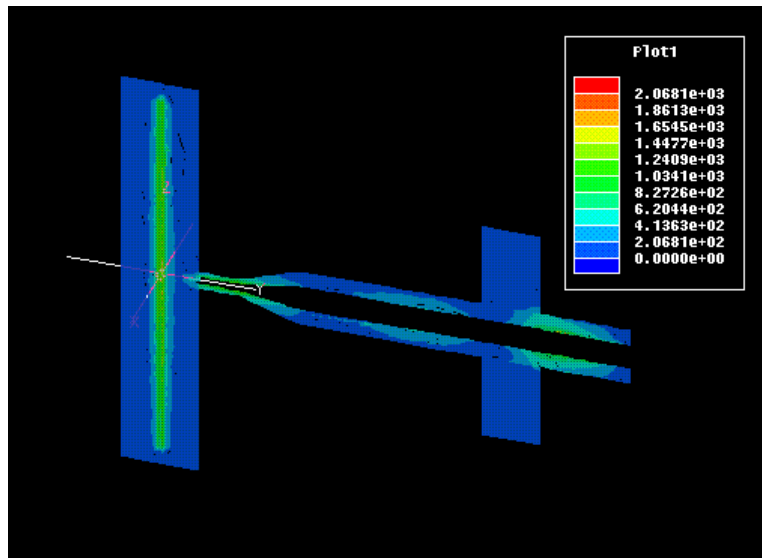


그림 6. 가속관과 결합기 내의 전기장 분포.

III. 결론

고주파 사중극자 가속관에 고주파 전력을 최대로 인가시킬 수 있는 즉 저손실 송전을 할 수 있는 동축형 고주파 결합기를 설계하였다. 설계된 고주파 결합기에서 도파관 단락판은 동축선로의 축 중심으로부터 153mm 위쪽에 위치하고, 동축선로 단락판의 위치는 도파관 왼쪽벽으로부터 371mm 위쪽에 존재한다. 가속관과 정합된 고주파 결합기의 반사계수는 350MHz에서 0.01이고 정재파비는 1.02:1이다. 현재 0.45MeV 고주파 사중극자 가속관과 동축선로형 고주파 결합기가 제작 완료되어 여러 가지 루우프 안테나에 대한 실험을 준비 중에 있다. 전원은 톰슨사의 1MW 클라이스트론을 사용할 예정이고, 운전을 위한 Low-Level 고주파 제어계의 제작이 완료되었다.

IV. 감사

HFSS 코드를 사용할 수 있도록 도와주신 포항가속기연구소의 황정연 박사님과 Ansoft Korea 사의 김만수 부장님께 감사드립니다. 본 연구는 과학기술부에 의해 지원되었습니다.

V. 참고문헌

- [1] C. K. Park et al., "The KOMAC Project: Accelerator and Transmutation Project in Korea", Proceeding of APAC98, Tsukuba, (1998).
- [2] B. H. Choi, "KOMAC", OECD NEA Workshop, (1998).
- [3] J. M. Han et al, "Design of the KOMAC H⁺/H⁻ RFQ Linac", Proceeding of LINAC98, Chicago, (1998).
- [4] J.M. Han et al., Design and Fabrication of the KOMAC RFQ , Proceeding of PAC99, New York, (1999).
- [5] J.M. Han et al., A 3.0MeV KOMAC/KTF RFQ Linac , Proceeding of LINAC2000, Monterey, (2000).