

스러그 튜너를 이용한 DTL 공동 튜닝에 관한 연구*

Study on the tuning of the DTL cavity using slug tuners

권혁중, 조용섭, 심찬보

양성자기반공학기술개발사업단

한국원자력연구소, 대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

양성자기반공학기술개발사업단에서는 저 에너지 양성자 가속장치로서 20MeV DTL (Drift Tube Linac)을 개발하고 있다. DTL 공동은 수십개의 cell로 이루어지며, 가공 및 정렬오차에 의해 발생된 주파수 및 전장 오차는 스러그 튜너를 이용하여 조절 및 정렬하게 된다. DTL 공동 제작 후 튜닝에 소요되는 시간을 줄이기 위하여 주파수 조절 및 전장 분포정렬을 포함하는 공동 튜닝에 관한 방법을 연구하였으며, 첫 번째 DTL 탱크에 대하여 전산 코드를 이용, 상기 방법의 타당성을 살펴보았다. 본 발표에서는 제안된 공동 튜닝 방법과 이를 이용한 계산 결과에 관해 보고한다.

Abstract

20MeV DTL (Drift Tube Linac) is being developed as a low energy proton accelerator by PEFP (Proton Engineering Frontier Project). A DTL cavity consists of several tens of cells, and the errors of resonant frequency and accelerating field profile of the DTL cavity produced by machining and alignment errors can be adjusted and corrected by using slug tuners. To reduce time and effort to tune the cavity, tuning method including resonant frequency adjustment and field profile correction was developed. To validate the tuning method, numerical simulation about the first tank of the DTL was carried out. In this paper, the summary of the proposed tuning method and the simulation results are presented.

* 본 연구는 과학기술부의 21세기 프론티어 사업으로 수행되었음.

1. 서 론

양성자기반공학기술개발사업단에서는 저 에너지 양성자 가속장치로서 20MeV DTL (Drift Tube Linac)을 개발하고 있다.¹⁾ 일반적으로 제작된 가속 공동은 가공 및 정렬 오차에 의해 발생된 주파수 및 전장 정렬 오차를 갖게 되며 튜닝을 통해 이를 보정하게 된다. DTL과 같이 수십개의 cell을 갖는 가속 공동의 경우 전장 정렬 오차는 cell 개수의 제공에 비례하며, 이 경우 공동 튜닝은 주파수 보정, 전장 분포 정렬, 외부 섭동에 대한 전장 분포 안정화를 의미한다. DTL의 경우 주파수 보정 및 전장 분포 정렬은 주로 스러그 튜너를 이용하며, 외부 섭동에 대한 전장 분포 안정화는 포스트 커플러를 이용한다.²⁾

제작된 공동은 공진 주파수의 경우 설계값의 1kHz 이내, 전장 분포는 각 cell에서의 축상 평균 전장값이 설계 전장값의 1% 이내에서 튜닝 되어야 하며, 따라서 공동 튜닝은 시간 및 노력을 요하는 작업이다.^{3), 4)} 이런 이유로 단순한 시행착오법을 이용하기보다 시간과 노력을 줄이면서 정확한 주파수 보상 및 전장 분포 정렬을 이룰 수 있는 체계적인 튜닝 방법에 대한 연구는 DTL 설계 단계부터 고려되어야 한다. 본 연구에서는 설계 주파수 및 전장 분포를 갖도록 측정된 전장 분포값으로부터 각 스러그 튜너의 위치를 결정할 수 있는 방법을 제안하였으며, 설계된 DTL의 첫 번째 탱크에 대해서 SUPERFISH 코드⁵⁾를 이용하여 상기 방법의 타당성을 조사하였다.

2. 공동 튜닝 방법

제안된 공동 튜닝 방법은 측정된 공동 전장 분포값을 이용하여 각 cell의 전장 오차를 최소화하는 스러그 튜너의 위치를 결정하는 것이 핵심이다. 각 스러그 튜너의 위치를 정렬하여 공동의 공진 주파수를 보상하고 스러그 튜너를 각각 단위 길이 이동하여 이로부터 얻어진 전장분포를 측정한 후 설계 전장 분포와의 오차를 최소로 하는 스러그 튜너의 위치를 최소 제곱법으로 결정하게 되며 이는 식 2-1 및 2-2에 나타나있다.

$$\sum_m 2(Y_{om} - (Y_m + \sum_n A_{mn} X_n))(-A_{mj}) = 0, \quad 2-1$$

$$\sum_n \Delta f_n X_n = \Delta f \quad 2-2$$

$$\begin{array}{ll} Y_{om} : m & E0 \\ Y_m : m & E0 \\ A_{mn} : n & m \quad E0 \quad (\quad) \\ X_n : n & (\quad) \\ \Delta f_n : n & (\quad) \\ \Delta f : & \\ m : cell & \\ n, j & \end{array}$$

스러그 튜너의 단위 길이 이동에 따른 전장 분포 변화 및 주파수 변화량은 스러그 튜너의 이동이 작을 경우 선형적이라고 볼 수 있으나, 스러그 튜너의 이동이 클 경우 비 선형적일 것이므로 위의 튜닝작업은 2~3회 반복하여야 한다.

3. 전산 코드를 이용한 계산

1) 모델 공동

위 방법의 타당성을 검토하기 위하여 모델 공동을 설정하고 SUPERFISH 코드를 이용하여 계산하였다. 모델공동은 설계된 20MeV DTL의 첫 번째 탱크¹⁾를 계산에 적합하게 변형한 형태이다. 설계된 탱크는 스템의 주파수 섭동 효과를 포함하여 cell 규격을 결정하였으므로 2D 코드인 SUPERFISH 코드를 이용하여 계산할 경우 설계된 일정한 크기의 전장 분포와는 달리 저 에너지 측으로부터 고 에너지 측으로 갈수록 음의 기울기를 갖는 전장 분포를 갖게 된다. 따라서 설계된 탱크의 각 cell의 drift tube (DT) 간격을 조절하여 일정한 크기의 전장 분포를 갖는 모델 공동을 설정하였다. 스러그 튜너 삽입을 고려하여 탱크 직경을 보정한 모델 공동의 주요 제원은 표 1과 같다.

표 1. 계산에 사용된 모델 공동의 제원

resonant frequency	349.00842MHz
No. of cells	51
Tank length	443.064cm
Tank diameter	54.3776cm
Drift tube diameter	13cm
Bore radius	0.7cm
Drift tube face angle	10degree
Drift tube flat length	0.3cm
Drift tube corner radius	0.5cm
Inner nose radius	0.2cm
Outer nose radius	0.2cm
Stem diameter	2.6cm
No. of slug tuners	8

2) 계산 방법

튜닝 방법의 타당성을 검토하기 위한 계산 방법의 순서는 다음과 같다.

- (1) 모델 공동의 공진 주파수 및 전장 분포를 계산한다.
- (2) 스러그 튜너의 주파수 조절 범위에 맞도록 (모델 공동의 경우 $\pm 1\text{MHz}$) 탱크의 직경을 변화시킨다.
- (3) 체계적인 공동의 가공 오차를 설정하고 이에 의한 주파수 변화 및 전장 분포 변화를 계산한다.
- (4) 가공 오차에 의한 주파수 섭동을 보상할 수 있도록 스러그 튜너를 삽입하고 전장 분포를 계산한다.
- (5) 각 스러그 튜너를 단위 길이 이동한 후 이에 의한 주파수 변화량과 전장 분포 변화량을 계산한다.
- (6) 식 2-1과 2-2를 사용하여 새로운 스러그 튜너 위치를 결정한다.
- (7) 결정된 위치로 스러그 튜너를 이동시킨 후 공진 주파수와 전장 분포를 계산한다.
- (8) 공진 주파수와 전장 분포가 각각 설계값의 1kHz 이내, 1% 이내가 될 때까지 (5)~(7)을 반복한다.

이때 비교하는 전장 분포값은 각 cell에서의 측정 평균 전장값으로 다음과 같이 정의된다

$$E_0 = \frac{\int E_z dz}{L} \quad 2-3$$

여기서 L은 cell 길이이며 적분구간은 한 cell에 대해서이다.

3) 가공 오차 설정

계산에 사용한 가공 오차는 탱크 직경 가공 오차와 DT 가공 오차이다. 계산시 체계적인 전장 분포의 변화를 관찰하기 위하여 직경 가공 오차는 설계값보다 0.2 mm 작은값으로부터 설계값까지 선형적으로 증가하는 형태, DT 가공 오차는 51개의 DT 모두 설계값보다 20 μm 작도록 설정하였으며 상기 가공 오차값은 실제 가공 가능한 오차의 2배에 해당한다.

4. 계산 결과

SUPERFISH 코드의 MDTFISH solver를 이용하여 계산한 전장 분포는 그림 1과 같다. 그림 1의 (a)는 섭동이 없는 경우 DTL 탱크내의 전장 분포이며 (b)는 가공 오차를 포함한 경우 전장 분포, (c)는 주파수 보정을 위해 스러그 튜너를 삽입한 경우, (d)는 측정 전장 분포를 설계값의 2% 이내가 되도록 튜너의 위치를 조절하였을 때의 전장 분포이다. 원래 DTL에 설치될 스러그 튜너는 실린더 형태이며 탱크의 하단부에 위치하나 2D 코드

를 이용하여서는 상기 스러그 튜너에 의한 효과를 계산할 수 없기 때문에 그림 1과 같이 스러그 튜너가 삽입될 위치에 동일한 주파수 섭동을 줄 수 있는 annual 형태의 모의 튜너를 이용하여 계산하였다. (a)의 경우 전체 탱크내에서 일정하던 전장 분포가 가공 오차에 의한 섭동에 의해 (b)와 같이 흐트러짐을 알 수 있고, 제안된 튜닝 방법을 이용하여 (d)와 같이 전장 분포를 정렬할 수 있음을 알 수 있다.

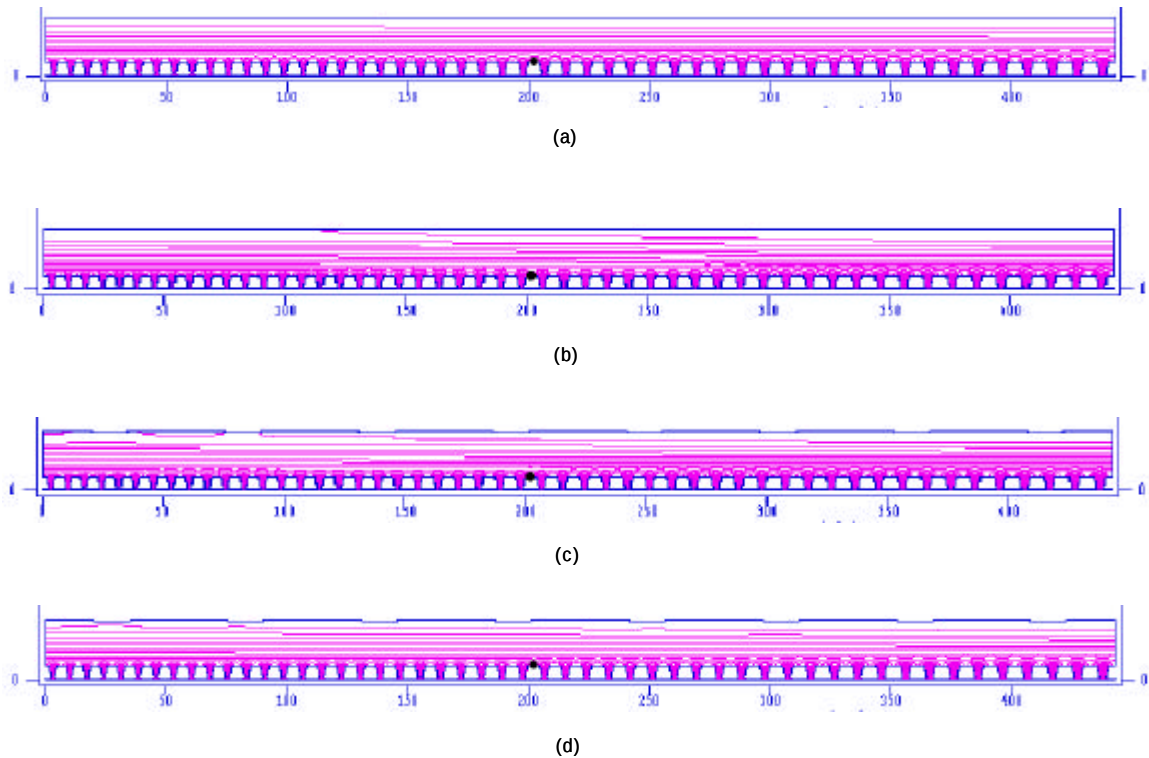


그림 1. MDTFISH solver를 이용한 DTL 공동내의 전장 분포 계산

- (a) 섭동이 없는 경우 전장 분포
- (b) 탱크 직경과 DT 가공 오차 섭동에 의한 전장 분포
- (c) 주파수 보정을 위해 튜너를 삽입하였을 때의 전장 분포
- (d) 튜닝 방법을 이용하여 스러그 튜너의 위치를 결정한 후 계산한 전장 분포

계산 결과 비교시 의미가 있는 양은 식 2-3으로 정의되는 각 cell에서의 축상 평균 전장 값이며 이를 비교한 그래프가 그림 2에 나타나 있다. 그림 2에서 섭동이 없는 경우 축상 평균 전장 분포는 원래의 경우 일정하여야 하나, 계산 코드의 격자 크기의 제한 때문에 각 cell의 공진 주파수는 일치하나 전체 탱크를 계산하였을 경우에는 1% 이내에서 기울기를 갖게되며 이는 저 에너지측의 공진 주파수 섭동이 설계 공진주파수 보다 높게 계산되었음을 의미한다. 탱크 직경 가공 오차와 DT 가공오차에 의한 각각의 축상 평균 전장

분포와 이들의 오차가 동시에 나타났을 경우 측정 평균 전장 분포가 그림 2에 나타나 있다. 주파수 섭동 오차를 체계적으로 저 에너지 측에서 공진 주파수가 증가하는 방향으로 설정하였기 때문에 전장 분포는 고 에너지 측으로 증가하는 기울기를 갖게되며 이는 multi cell 공동을 전송선으로 모사하여 얻을 수 있는 섭동 이론과 일치하는 경향을 보인다.²⁾ 전장 분포 정렬을 위해 각 튜너를 단위 길이 이동시킨 후 얻은 전장 분포는 그림 3과 같다. 단위 길이를 이동할 때의 방향이 공진 주파수를 증가시키는 쪽이므로 전장 분포는 주파수가 증가하는 부분에서 감소하며, 상대적으로 주파수가 감소하는 부분에서 증가하는 경향을 보이며 이와 같은 경향은 이론으로부터 쉽게 예측할 수 있는 결과이다. 그림 3에서 얻은 결과를 이용, 제안된 튜닝 방법으로부터 새로운 스러그 튜너의 위치를 결정하였으며 이때의 측정 전장 분포가 섭동이 없을 경우, 그리고 섭동이 있는 경우와 비교하여 그림 4에 나타나 있다. 그림 4에 나타나 있듯이 제안된 튜닝 방법에 의해 스러그 튜너의 위치를 설정함으로써 한번의 반복 계산에 의해 주파수 보정과 동시에 설계값의 $\pm 4\%$ 분포를 갖던 전장 분포를 $\pm 2\%$ 이내로 줄일 수 있었다. 더 이상의 반복 작업은 코드의 격자 크기에 대한 제한 때문에 의미있는 결과를 얻을 수 없었다.

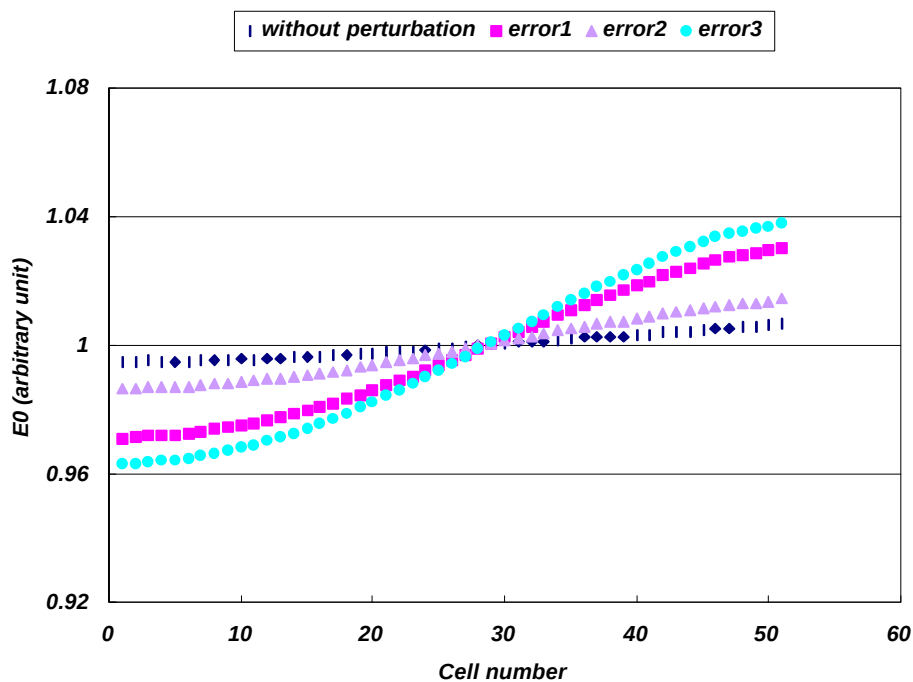


그림 2. 섭동이 없는 경우와 가공 오차에 의한 주파수 섭동이
 있는 경우 측정 평균 전장 분포
 error1 : 탱크 직경 가공 오차
 error2 : DT 가공 오차
 error3 : error1 + error2

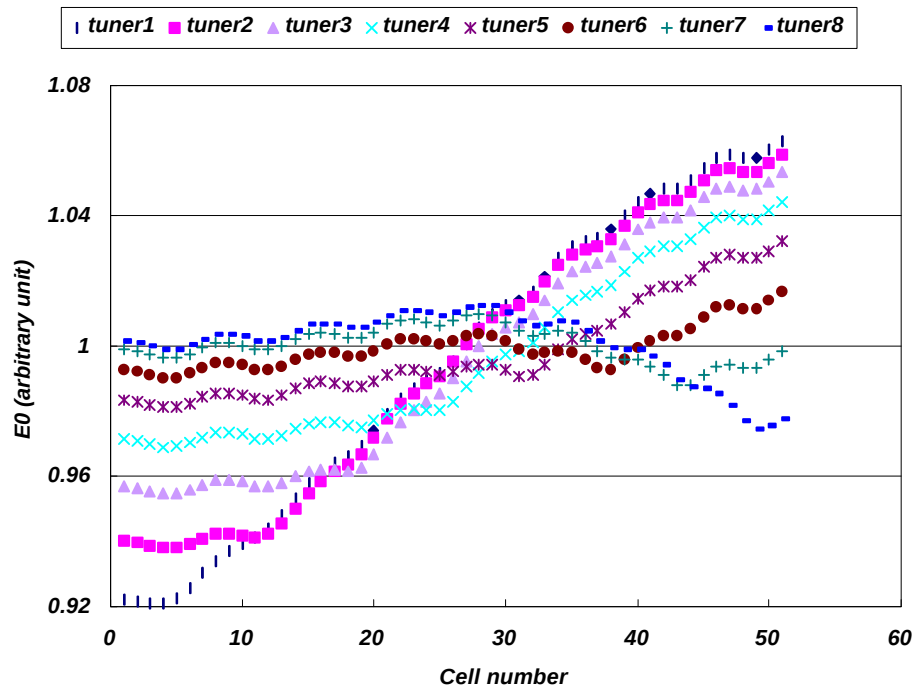


그림 3. 각 슬러그 튜너를 단위 길이 이동시켰을 때의 축상 평균 전장 분포

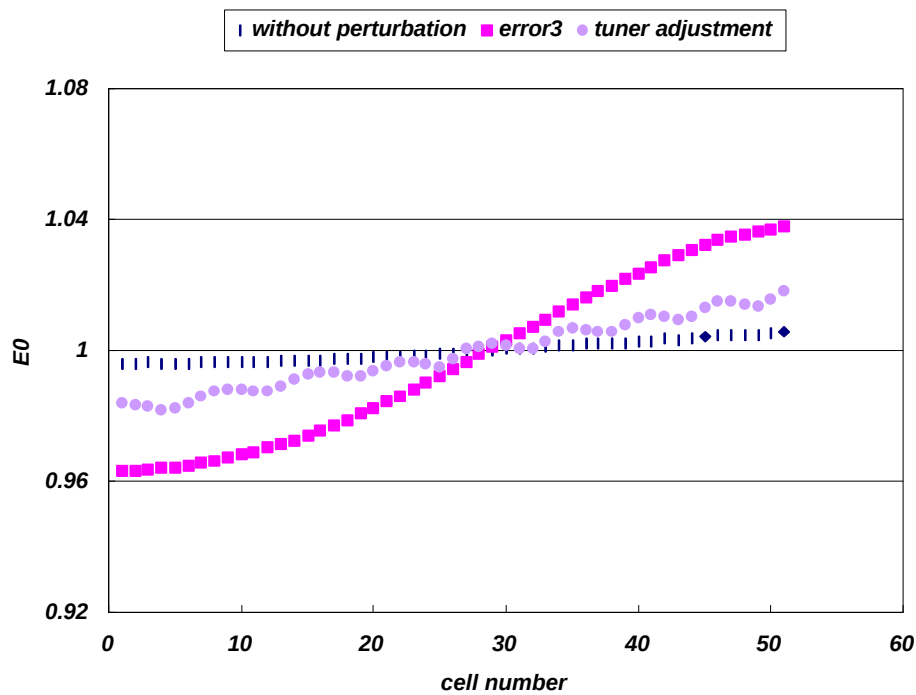


그림 4. 튜닝 방법에 의한 보정된 슬러그 튜너를 이용하여 계산한 전장 분포

5. 결론

DTL 제작 후 공동 튜닝을 할 때 단순한 시행착오법을 이용하기보다 시간과 노력을 줄이면서 정확한 주파수 보상 및 전장 분포 정렬을 이룰 수 있는 체계적인 튜닝 방법을 제안하였으며 이의 타당성을 SUPERFISH 코드를 이용하여 살펴보았다. 모델 공동은 설계된 20MeV DTL의 첫 번째 탱크를 계산에 적합하도록 변형한 형태이며, 체계적인 가공 오차에 의한 주파수 섭동을 주어 전장 분포를 계산하였고 제안된 튜닝 방법에 따라 상기 주파수 섭동에 의한 공동 공진 주파수 및 전장 분포를 보상할 수 있는 스러그 튜너의 위치를 결정하였다. 계산 결과 제안된 공동 튜닝 방법을 이용, 1회의 반복작업을 거쳐 공진 주파수는 설계값의 5kHz 이내, 각 cell의 축상 평균 전장값은 설계값의 2%이내에서 공동을 튜닝할 수 있음을 알 수 있었다. 더 이상의 반복 작업은 코드로 계산할 수 있는 현실적인 격자 크기의 제한 때문에 의미있는 결과를 얻을 수 없었다. 그러나 위의 결과로부터 DTL 공동 튜닝시 스러그 튜너 위치에 대한 체계적인 예측을 할 수 있으며 그 예측 결과를 이용한 계산 결과로부터 상기 제안된 방법은 충분히 의미있는 튜닝 방법이라고 판단할 수 있다. 위의 튜닝 방법을 이용할 경우 2~3회의 반복작업을 거쳐 공동 주파수 및 전장 분포를 튜닝할 수 있을리라고 예상하고 있으며 이때 필요한 공동 전장 분포 측정 횟수는 20~30회 정도가 될 수 있다.

6. 참고 문헌

- 1). Y. S. Cho, et al., "KOMAC DTL (3MeV~20MeV), Preliminary Design Report", PE-30000DD-P001, 2002.
- 2). Thomas P. Wangler, "Principles of RF Linear Accelerators", John Wiley & Sons, Inc., 1998.
- 3). J. H. Billen, et al., "Room-Temperature Linac Structures for the Spallation Neutron Source", Proc. of 2001 Particle Accelerator Conference, P1104, 2001.
- 4). F. Naito, et al., "Mechanical and RF Properties of the DTL for the JAERI/KEK Joint Project", Proc. of XXI International Linac Conference, to be published.
- 5). J. H. Billen, L. M. Young, "POISSON/SUPERFISH", LA-UR-96-1834, Los Alamos National Laboratory, 2002.