

순차적 근사화기법을 이용한 10 MeV AVF 사이클로트론 전자석 설계

김수현*, 곽창섭*, 이세희*
경북대학교*

Electromagnet Design for 10 MeV AVF Cyclotron Using the Sequential Approximation Technique

Su-Hun Kim*, Chang-Seob Kwak*, and Se-Hee Lee*
Kyungpook National University*

Abstract - 본 논문에서는 사이클로트론 전자석의 설계과정을 체계화하고, 자기장 최적화 과정을 순차적 근사화 기법을 이용하여 설계를 진행하였다. 설계하는 전자석은 방사성동위원소생산을 목적으로하는 PET (Positron Emission Tomography) 사이클로트론이며, 크기를 줄이고 동위원소의 효율적인 생산을 위해 에너지대역은 10MeV로 선정하였다. 설계과정은 실험계획법 중 하나인 LHS(Latin Hypercube Sampling) 기법을 통해 샘플 데이터를 구성하고, 이를 바탕으로 크리깅을 이용해 근사 모델을 구성한다. 근사 모델과 진화 알고리즘을 이용해 목적에 맞는 최적의 형상을 찾을 수 있다. 이러한 과정을 반복함으로써 점진적으로 목적에 부합하는 형상을 찾을 수 있다. 각각의 형상의 성능을 판단하는 목적함수를 단계별로 규칙을 정함으로써 결과의 신뢰도를 높인다. 이로써 시간적 효율을 증대시키고 전문지식이 부족한 설계자도 고성능의 형상을 얻을 수 있다. 최적화과정은 STEP1과 STEP2로 나누어 진행되며, STEP1에서는 초기사이클로트론 전자석을 설계하고, 자기장 최적화를 진행한다. STEP2에서는 빔 시뮬레이션 및 분석을 통하여 최적화를 진행하고, 최종적으로 전자석모형을 완성한다.

<표 1> 10 MeV 사이클로트론 마그넷 설계변수

설계변수	값
최대에너지	10 MeV
가속입자	H
RF 주파수	83.2 MHz
Dee 전압	40kV
조화수	4
폴 반지름	0.38 m
섹터각도	56 °

1. 서 론

최근 방사성동위원소생산을 목적으로 하는 낮은 에너지 대역의 사이클로트론의 수요가 증가함에 따라 여러 형상의 사이클로트론들이 개발되어 왔다[1]-[2]. 기존의 사이클로트론 전자석 설계는 원하는 에너지대역의 에너지를 안정적으로 가속시키기 위한 자기장보정이 어려움에 따라 설계에 많은 시간이 소모된다. 그러나 기존의 설계방식에 수치 최적화과정을 도입함으로써 설계에 소모되는 시간을 줄이고, 인력소모 또한 줄일 수 있다. 따라서 본 논문은 방사성동위원소 ¹⁸F의 생산을 목적으로 하는 10MeV AVF 사이클로트론 전자석을 수치 최적화과정을 도입한 설계방법을 제안한다.

먼저, 계산에 의한 초기설계모형을 설계하고 자기장 최적화 과정을 진행한다. 최적의 형상을 얻기 위해 진화알고리즘을 적용한 크리깅 기법을 이용하여 설계를 진행한다. 설계과정은 전자석의 형을 반지름에 따라 각도를 조절하여 자기장을 최적화 한다. 이후, 빔 시뮬레이션을 통하여 빔의 궤적 및 빔의 에너지를 확인하여 신뢰도를 확보한다. 마지막으로 이러한 빔 특성이 만족하는 범위를 충족시켜 최종 전자석설계를 완성한다.

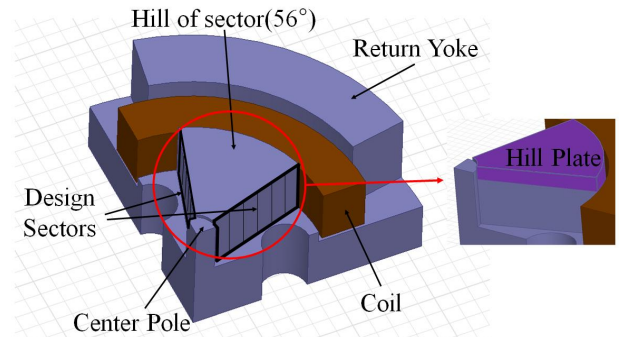
2. 본 론

2.1 사이클로트론 전자석의 초기설계

사이클로트론 전자석은 가속할 입자의 종류와 최대 가속에너지로부터 필요한 자기장도를 계산할 수 있다. 자기장도계산을 통해 초기 전자석의 크기와 자기장 등 초기변수들을 계산할 수 있고, 자기장도계산은 다음의 식을 이용한다.

$$B \cdot r = \frac{\sqrt{T^2 + 2TE_0}}{300Z} \quad (1)$$

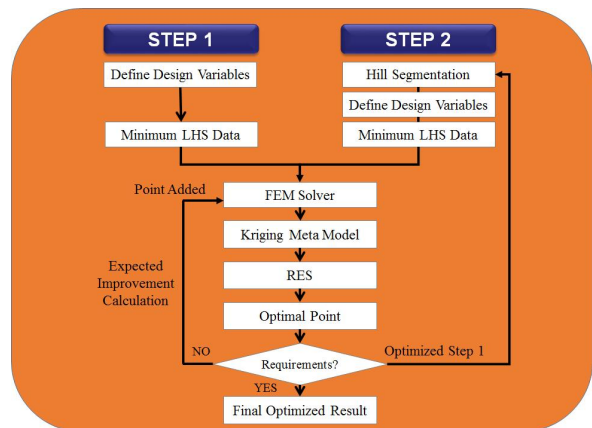
여기서 B는 빔의 인출자기장, r은 빔의 인출반경, T는 입자의 최대가속에너지, E₀는 양성자의 정지에너지, Z는 원자번호이다. 식 (1)로부터 설계하려는 전자석의 자기장도는 0.458T·m 으로 계산되었고, 계산된 자기장도를 이용하여 전자석의 사이즈와 자기장과 같은 설계변수들을 결정하였다. 전자석 설계변수들은 표1에 정리하였으며, 이러한 변수들을 바탕으로 전자석의 초기모형을 설계하였다. 그림 1은 설계변수를 이용한 초기의 전자석 모델이며, 설계하는 전자석의 여러 부분을 나타내었다. 그리고 자기장 최적화는 STEP1에서 전자석 형의 일부분의 각도를 변화시키는 방법인 슈밍을 통해 진행되며, 정밀한 자기장 최적화를 위해 STEP2에서 형을 두 부분으로 나누어 슈밍을 진행한다.



<그림 1> 초기의 전자석형상 및 구조(1/8형상)

2.2 순차적 근사화 기법을 이용한 전자석 최적화

사이클로트론 전자석의 자기장분포는 형상의 작은 변화에도 민감하게 변화한다. 게다가 3D 자기장 해석은 많은 시간이 필요하기 때문에 모든 설계 변수 범위 내의 형상들을 해석을 진행하기에는 시간적 제약이 존재한다. 따라서 유한요소해석기법을 이용한 신뢰도를 좀 더 높일 수 있는 해석방법이 필요하다. 이러한 이유로 LHS기법, 크리깅 메타 모델, 진화 알고리즘을 적용한 순차적 근사화 기법을 이용하여 전자석 자기장 최적화를 진행하고, 그 과정은 그림 2에 나타내었다.



<그림 2> 전자석 최적설계 프로세스

자기장 최적화 과정의 체계는 다음을 따른다.; 1) 그림 1에서 나타난 설계범위를 설정하고 LHS기법을 사용해서 목적함수의 경향성을 파악할

수 있는 최소 표본을 추출한다. 2) 유한요소해석을 통해 목적함수와와의 관계를 분석하게 된다. 분석 데이터를 바탕으로 3) 크리깅을 사용하여 근사모델을 구성한다. 이렇게 구성된 근사모델이 추후 필요한 유한요소 해석을 대신 하게 된다. 근사 모델은 입력값에 대한 결과 값을 얻는 데 시간적 소요가 거의 없기 때문에 이를 이용하여 최적화 알고리즘인 4) RES(Restricted Evolution Strategy)를 이용하여 최적설계 변수 후보를 추출한다[3]. 5) 추출된 최적 설계변수에 대해 FEM 해석을 수행하고 수렴여부를 확인한다. 6) 수렴이 되지 않았을 때는 다시 크리깅 단계로 돌아가서 수행된다. 이는 만족하는 조건을 얻을 때 까지 4-6과정을 반복 진행한다. STEP1에서 얻어진 최적형상에서 전자석의 Hill Plate을 분리한 형상을 STEP2의 초기 모델로 설정하고 설계영역 및 변수 범위를 선정한다. 이후 1-6과정이 반복된다.

가속되는 입자는 가속되어짐에 따라 회전반경이 커지고, 상대론에 의해 입자의 질량은 증가한다. 입자의 질량이 증가하면 회전주파수는 변형되고, 안정된 가속에너지를 얻기 위해서는 각주파수가 반경이 증가함에 따라 RF주파수와 일정하게 유지되어야 한다. 이에 따라 쉬밍을 통한 자기장을 변화를 시킴으로써, 입자의 회전 각주파수를 일정하게 유지할 수 있으며, 그 식은 다음과 같다[4].

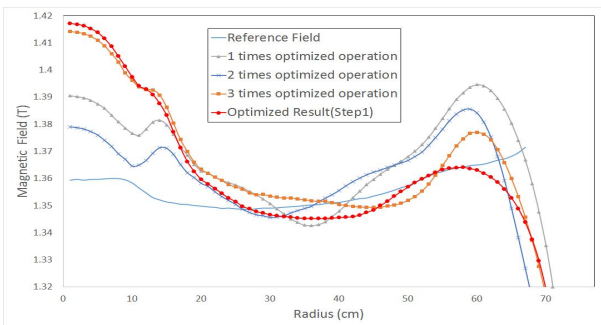
$$\Delta B(r) = \gamma^2 B(r) \frac{\Delta f(r)}{f_p(r)} \quad (2)$$

여기서 B(r)은 반경에 따른 자기장, γ 는 로렌츠 상수, $f_p(r)$ 는 회전하는 입자의 각 주파수, $\Delta f(r)$ 은 입자의 각주파수와 RF주파수와의 차이이다. 식 (2)를 이용하여 입자가 안정하게 가속할 수 있는 범위의 레퍼런스 자기장을 확보하였으며, STEP1의 최적화 과정은 레퍼런스 자기장에 근접하게 맞추어 나가는 과정으로 진행한다. 이후 빔 시뮬레이션을 통해 입자가 Dee 갭을 지날 때 RF위상과 입자의 회전위상의 차이를 확인할 수 있다. 위상차는 입자의 회전반경이 늘어날수록 점차 누적이 되고, 이를 누적위상오차 라고 한다. 이러한 위상차가 특정범위 안에 있으면 입자가 Dee갭을 지날 때 안정적으로 가속에너지를 얻을 수 있으며, 특정범위를 벗어나게 되면 오히려 감속을 일으키게 된다. 그러므로 누적위상오차는 특정범위 안에 들어와야 하며, 그 범위는 다음과 같다[5].

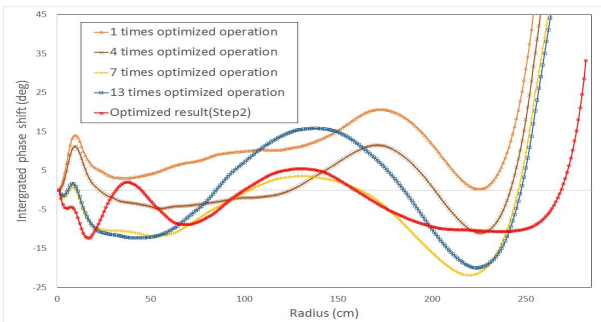
$$\Phi \leq \pm \frac{\theta_{dee}}{2} \quad (3)$$

여기서 Φ 는 누적위상오차, θ_{dee} 는 RF시스템의 각도이다. 본 논문에서 RF시스템은 30도로 설정하였으며, 따라서 누적위상오차는 ± 15 도 안에 들어오는 조건을 충족시켜야한다.

2.3 결과 및 토론



〈그림 3〉 STEP1의 반지름에 따른 평균자기장 최적화 과정

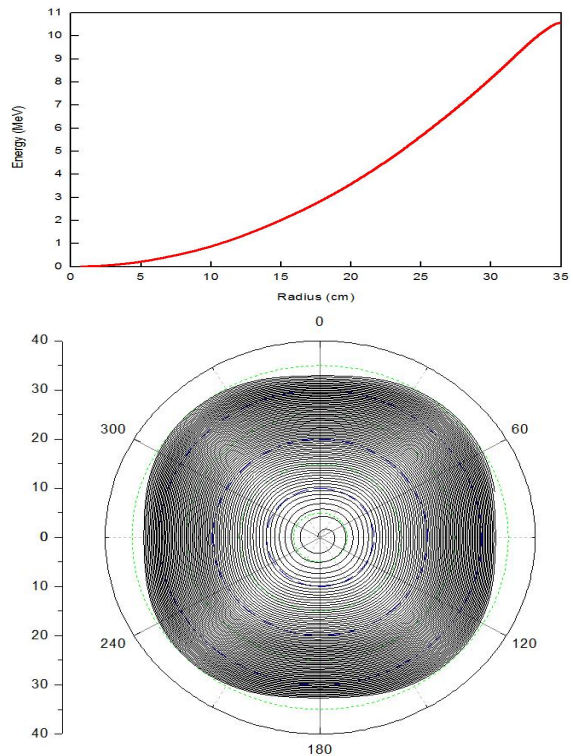


〈그림 4〉 STEP2의 반지름에 따른 누적위상오차 최적화 과정

먼저 STEP1의 자기장 최적화 과정을 진행하였으며, 그 과정을 그림 3에 나타내었다. 그림 3의 자기장 데이터는 전자석의 반경에 따라 평균

자기장을 나타내었다. STEP1의 자기장 최적화 과정은 총 3번의 반복과정을 통해 최적화 하였다. 최적화된 자기장의 앞부분은 레퍼런스 자기장과 약 50mT 정도의 차이를 보이는데, 이는 초기의 가속되는 입자는 빔 에너지가 약하기 때문에 감소하는 자기장을 이용하여 빔을 수직집속하여야 한다. 따라서 앞부분의 자기장 차이의 발생은 필수적이며, 이러한 차이에 의해 발생한 빔의 위상오차는 STEP2에서 빔 시뮬레이션을 통해 보정한다. STEP2의 자기장 최적화과정은 그림 4에 나타내었으며, 총 17번의 반복과정으로 최적화 하였다. 그림 4에서 볼 수 있듯이, 최적화과정이 진행 될수록 누적위상오차는 ± 15 도에 가까워지며, 최적화된 자기장은 누적위상오차 조건에 만족함을 볼 수 있다.

STEP1과 STEP2의 최적화과정을 통해 최종적으로 최적화된 자기장 데이터를 얻었으며, 이를 이용하여 빔 시뮬레이션을 진행하였다. 빔 시뮬레이션을 통해 가속되는 입자는 본 논문에서 목표로 하는 10MeV 에너지 및 빔의 가속궤적을 확인하였으며, 이를 그림 5에 나타내었다. 그림 5를 통해 반경 35cm에서 빔 에너지는 10.5MeV이고, 빔의 궤적은 겹치지 않고 잘 회전하는 것을 확인할 할 수 있다.



〈그림 5〉 최적화된 전자석에서의 빔 에너지 및 궤적

3. 결 론

본 논문에서는 순차적 최적화 기법을 이용하여 전자석 설계를 진행하였다. 제안된 설계 기법을 통해 전자석의 자기장을 최적화 하였으며, 빔 시뮬레이션을 통해 빔의 에너지 확인을 하였다. 이를 통해 기존의 설계 방식뿐만 아니라 최적화기법을 적용한 설계방식으로 설계가 가능함을 알 수 있는 동시에 전자석 자동화 설계 프로세스를 구축함으로써 시간적 효율을 높였다. 따라서 본 논문을 통해 사이클로트론 전자석 설계의 효율성과 초기 진입장벽을 낮출 것으로 기대된다.

[참 고 문 헌]

- [1] B. F. Milton, "Commercial compact cyclotrons in the 90's," in Proc.14th Int. Conf. Cyclotrons and Their Applications, pp. 99 - 106, 1995.
- [2] Y. Jongen, "Review of compact commercial accelerator products and applications," in Proc. PAC'97, pp. 3770 - 3774, 1997.
- [3] Shinkyu Jeong, "Efficient Optimization Design Method Using Kriging Model", Journal of Aircraft, Vol. 42, No. 2, pp.413-420, 2005.
- [4] Y. Jongen, Cyclotron magnet calculations, Ion Beam Applications s.a., pp.139-146, 1996.
- [5] J.S.Kang, Design and Fabrication of Conventional/Superconducting Cyclotron Magnets for Medical Accelerator, Doctorate thesis, Sungkyunkwan University, 2007.