

지능형 제어기법을 이용한 싸이클로트론의 이온 빔 제어에 관한 연구

論 文

49D-1-2

A Study on the Ion Beam Control of Cyclotron using Intelligent Control

金 裕 錫* · 曹 永 鎬** · 蔡 鐘 緒* · 權 奇 浩***

(Yu-Seok Kim · Young-Ho Cho · Jong-Seo Chai · Key-Ho Kwon)

Abstract - Recently, as the field of cyclotron application is to be wider, to inject the beam where the user want to is getting more important. But since it is not the easy way to describe the model equation of cyclotron, it could be operated by only operator's experiences. In this paper, we suggest the cyclotron controller using the fuzzy logic and the genetic algorithm. The proposed controller was verified in useful by applying to the cyclotron's beam line. In the experiment the measured results were obtained by VXIBus and the control algorithm was performed by LabWindows/CVI.

Key Words : Cyclotron, Fuzzy Controller, Genetic Algorithm, VXIBus, LabWindows/CVI

1. 서 론

현재 싸이클로트론에서 주로 사용되는 제어방식은 과거에 측정된 데이터 값을 기반으로 운영자의 경험에 의거하여 적당한 변수 값을 입력시킴으로써 제어되고 조정되는 방법을 주로 이용하고 있다. 그러나 이런 경험적인 방법으로 조정된 변수 값들도 시스템의 내·외부 변수에 의해 항상 변화되기 때문에 운영자는 빔의 상태를 계속적으로 감시하고, 제어 변수 값을 상황에 맞게 최적화 시켜야하므로 많은 시간적 소모와 경제적인 낭비를 초래하는 단점을 갖는다. 또한 근래에 와서 싸이클로트론이 핵물리 분야뿐 아니라 공학 분야 및 생명공학 분야에서도 널리 이용됨에 따라 표적물에 정확한 입사가 매우 중요 시 되고 있는 추세다. 따라서 현재 사용되고 있는 경험적인 방식을 탈피한 제어 시스템의 설계가 무엇보다도 중요한 문제로 대두되고 있다[1, 2].

1980년대 이후 싸이클로트론의 자동화를 위해 비선형적인 특성에 가장 잘 부합될 수 있는 지능제어 개념이 도입되었고 이론적 실용적으로 많은 성과를 거두었다. 1989년에는 S. Clearwater와 W. Cleland가 전문가 시스템을 도입한 이온빔 계측장치를 제작하였고[3], D. Schultz는 전문가 시스템을 이용하여 빔 수송단 제어시스템을 설계하였으며[4], 1991년에는 D. Nguyen등이 신경회로망을 이용한 빔 수송단을 선보인 바가 있다[5]. 또한 1995년에 원자력연구소에 설치된 MC-50 싸이클로트론의 경우도 지능제어 방식을 일부 빔 라

인에 적용하여 우수한 성능을 보인바 있다[2].

퍼지 제어기는 인간의 언어 중에 포함되어 있는 불확실함을 정량적으로 표현하는 알고리즘으로 시스템의 특성이 복잡하여 기존의 정량적인 제어방식으로 해석할 수 없거나, 얻어지는 정보가 정성적이고 불확정적인 경우에 기존의 제어기에 비해 우수한 성능을 나타내는 것으로 알려져 있다 [6]. 퍼지 제어기는 전문가의 지식과 경험을 토대로 하여 제어규칙을 구성하고 반복적인 실험을 통하여 만족할 만한 성능이 나올 때까지 시행착오적으로 제어기를 설계해야 하기 때문에 입출력 변수가 많은 시스템의 경우는 알고리즘 구현이 어렵다는 단점을 갖는다[7, 8]. 유전 알고리즘은 기존의 최적화 알고리즘들과 비교할 때 파라미터 영역의 연속성과 미분 값의 존재성과 같은 조건이 필요치 않고, 지역적인 탐색이 아닌 전역적으로 탐색하기 때문에 지역수렴 확률을 줄일 수 있는 장점을 갖고 있다[9-11].

본 논문에서는 정량적으로 수학적 모델을 구축하기 어려운 싸이클로트론의 자동화를 위해 퍼지 논리제어와 유전자 탐색 알고리즘을 복합적으로 이용한 지능형 제어기를 설계하고, MC-50 싸이클로트론 빔 수송 계통에 실제 적용하여 제안된 제어기의 우수성을 입증하고자 한다. 이온 가속 장치인 싸이클로트론은 인간의 제어지식과 경험을 이용 할 수 있다는 점에서 퍼지 제어를 적용하기에 좋은 대상이 될 수 있다. 그러나 싸이클로트론 시스템은 많은 입출력 변수들이 이용되기 때문에 기존의 퍼지 제어기를 이용할 경우에 전문가의 지식과 일치하는 퍼지 추론의 결과를 만들기가 매우 어렵다. 따라서 본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하기 위하여 단일 입출력 제어기에 는 전문가의 지식을 포함하는 퍼지 제어를 사용하고, 전체 제어시스템에는 단일 입출력 제어기를 선택하기 위한 유전자 알고리즘을 채용하였다. 또한 H/W장치의 구성은 최근에 산업용 BUS로 널리 이용되고 있는 VXIBus를 도입하여 실시간으로 데이터를 획득, 분석할 수 있도록 하였다[12, 13].

* 正 會 員 : 韓國原子力研究所 싸이클로트론室 先任研究員

** 正 會 員 : 成均館大 電氣電子컴퓨터工學部 博士課程

*** 正 會 員 : 成均館大 電氣電子컴퓨터工學部 教授 · 工博

接受日字 : 1999年 8月 14日

最終完了 : 1999年 12月 8日

2. 퍼지 및 유전자 알고리즘의 결합

퍼지 제어기는 숙련자의 경험적 지식을 활용하여 제어가 판단능력을 보유하도록 하는 것으로 보통 퍼지화(fuzzification), 제어규칙(rule), 추론(inference) 및 비퍼지화(defuzzification) 부분으로 구성되며, 숙련자의 경험과 지식을 언어적 표현으로 나타내고 이를 제어형태로 변환하는 기능을 수행한다. 그러나 기존의 퍼지 제어기는 입출력 변수가 많은 시스템의 경우는 알고리즘 구현이 어렵다는 단점을 갖는다.

유전자 알고리즘은 다윈의 생물 진화 이론에 기초를 두고 개발된 알고리즘으로 주어진 환경에 따라 적자생존의 방법으로 진화하여 최적의 상태에 도달하는 현상을 모방한 탐색 알고리즘이다. 유전자 알고리즘은 매개변수를 부호화 시킨 염색체(chromosome) 및 적합함수(fitness function)라는 평가함수를 이용해 최적 해를 찾게되며, 병렬처리가 가능하기 때문에 전역탐색(global search) 능력이 우수하고 수렴속도가 빠르다는 장점을 갖고 있다[11].

싸이클로트론과 같이 입 출력변수가 많은 비선형 대규모 시스템의 경우에는 퍼지 알고리즘만으로 제어를 구현하기가 매우 어렵다[14]. 따라서 본 연구에서는 그림 1과 같이 여러 개의 퍼지 시스템을 병렬적으로 이용하고, 필요한 제어를 선택하기 위한 관리부분(management part)은 유전 알고리즘에 의해 변경되고 퍼지 제어를 관리하는 방식을 제안했다.

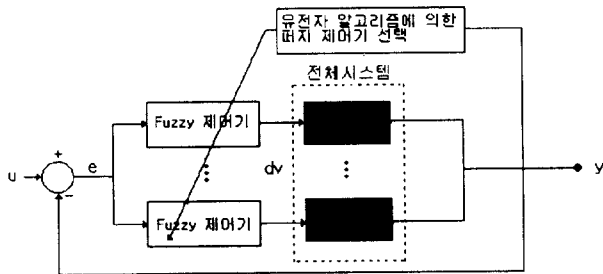


그림 1 제안한 퍼지 유전자 알고리즘
Fig. 1 Proposed fuzzy and genetic algorithm

그림 1은 본 연구에서 제안된 퍼지 및 유전자 알고리즘을 나타냈는데, 그림에서 알 수 있듯이 여러 개의 독립적인 퍼지 제어기로 구성되며 원하는 최종 출력결과를 얻기 위하여 각 제어기들을 관리하는 계층적 방식을 이용하였다. 여기서 u는 시스템의 입력 함수이며, e는 입력함수와 출력함수의 차로 정의된 오차, de는 오차 변화분, dv는 퍼지제어기 출력, y는 시스템의 출력이다.

그림 2는 퍼지 제어기가 A~E까지 사용될 경우에 제어기의 동작 순서를 나타냈으며, [단계1]~[단계6]의 6단계를 이용해 최적한 제어값을 찾게 된다.

- [단계1] 사전지식에 의하여 가중치를 포함하는 초기개체군을 생성한다. 초기 가중치 $W_1 \sim W_5$ 를 통해 퍼지 제어기를 선택한다. 가중치는 퍼지 제어기의 선택 및 제어기들의 제어 순서를 결정하는데 이용된다.
- [단계2] 퍼지 제어기 A~E는 모두 동일 시각에 속해 있으며 선택된 퍼지 제어기들은 퍼지 소속함수를 발생

시킨다. 이때 동일한 가중치가 발생할 경우에는 지정된 제어순서로 처리한다.

- [단계3] 제어가 결정된 제어기는 퍼지 제어기의 결과 값에 의해 제어 값을 결정한다.
- [단계4] 계측시스템에 의해 출력 값을 측정 후 적합도를 결정한다.
- [단계5] 개체들의 적합도를 측정 후 개체군은 유전자 알고리즘에 의해 재조정된다. 여기에는 선택, 교배, 돌연변이 등이 포함된다.
- [단계6] 다음세대의 개체군이 새로 발생한다. 즉 새로운 가중치군(유전자 개체군)을 만들어낸다.

3~6단계를 허용된 적합도 값에 도달될 때까지 반복한다.

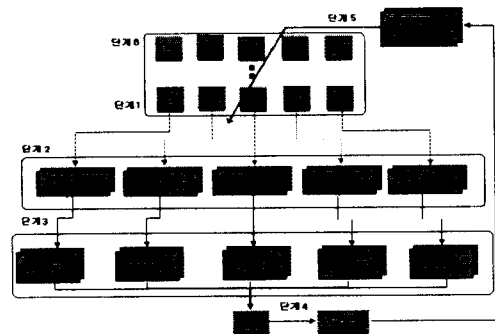


그림 2 제안된 알고리즘의 블록도
Fig. 2 Block diagram of proposed algorithm

여러 독립적인 제어기들 중 필요한 제어를 선택하기 위한 개체군은 유전자 알고리즘을 적용하기 위해 개체들로 구성시킨다. 개체군 내에 있는 한 개의 개체는 0과 1사이의 실수 값을 갖는 가중치를 포함하는 개체값으로 표현되는데, 제어기가 n개일 경우는 다음과 같이 개체군을 설정한다.

$$\begin{pmatrix} w_{11} & w_{12} & w_{13} & w_{14} & \dots & w_{1n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{pmatrix} w_{j1} & w_{j2} & w_{j3} & w_{jn} & \dots & w_{jm} \end{pmatrix}$$

단, w : 가중치, n : 제어기 수 j : 개체수

식(1)에서 정의된 각각의 가중치들은 식(2)를 이용해 m비트 해상도를 갖는 가중치 값을 결정한다.

$$w = decimal(b_1 b_2 \dots b_m) \cdot \frac{1}{2^m - 1} \quad (2)$$

여기서, $b_1 \sim b_m$: 각각 0 또는 1의 유전자
decimal(x) : 이진수를 십진수로 변환해 주는 함수

3. 지능형 싸이클로트론 제어기 설계

3. 1 MC-50싸이클로트론

MC-50 싸이클로트론은 양성자를 최대 51MeV까지 가속

가능한 에너지 가변형 경이온 가속장치로 공학, 의학, 물리학 등에 이용할 수 있는 시스템이다. 싸이클로트론은 전자석, RF장치, 진공장치, 인출장치, 빔 수송장치 등이 상호 연관적으로 결합되어 있는 비선형 특성이 강한 대규모시스템으로 그림 3과 같은 주요장치들로 구성되어 있다[15].

제어대상인 빔 라인단은 27개의 전자석 및 전원 공급장치들과 7개의 빔 진단장치로 구성되어 있다. 싸이클로트론에서 생성된 이온입자를 특정한 용도로 사용하기 위해서는 빔 수송장치를 이용해 빔 사용자의 요구조건에 부합하도록 빔의 크기와 모양을 조정해야 한다. 빔 수송장치는 4극 전자석(Quadrupole lens), 위치조정 전자석(Steering magnet), 스위칭 전자석(Switching magnet)으로 구성되어 있고, 빔의 모양과 크기를 측정할 수 있는 이온빔 계측장치가 부착되어 있다.

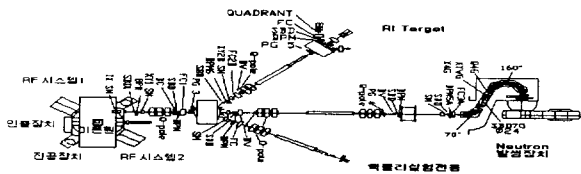


그림 3 MC-50 싸이클로트론
Fig. 3 MC-50 Cyclotron

4극 전자석은 2쌍(doublet) 또는 3쌍(triplet)으로 구성되며 빔의 집속화(focusing)에 이용된다. 위치조정 전자석은 빔 라인상의 빔의 수직, 수평상의 위치 조정을 담당하며, 스위칭 전자석은 빔의 방향 선택에 사용된다.

빔의 집속에 사용되는 장치인 4극 전자석에 대하여 살펴보면 2쌍 전자석보다는 3쌍 전자석이 주로 사용되는데, 3쌍 전자석(Q_1, Q_2, Q_3)의 경우 그림 4와 같이 포커싱(focusing)

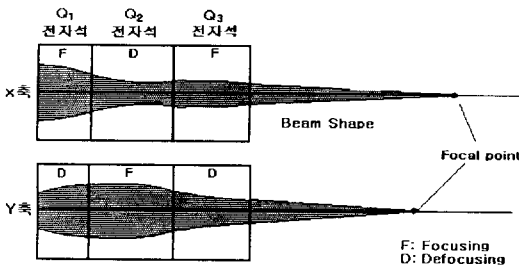


그림 4 빔 라인에 장착된 4극전자석의 동작원리
Fig. 4 Principle of Quadrupole lens in the beamline

과 디포커싱(defocusing)을 통하여 X, Y축을 집속하게 된다. 그러나 그림에서 보여지는 바와 같이 X축에 대한 포커싱을 취하면 Y축에 대한 디포커싱이 일어나는 상관관계를 가지며 빔 수송단의 제어에 중요한 고려사항이 된다.

3. 2 퍼지 제어기 설계

퍼지 제어기는 잡음 필터나 개개장치들의 에러를 제거할 필요가 없으며 기존 운영방식에 의한 제어지식을 이용할 수

있는 장점을 갖는다. 그러나 퍼지 제어기는 튜닝 값 근처에서 발생하는 오실레이션 문제, 오차에 대한 지역 최소값 만을 얻게되는 문제가 해결되어야만 한다. 따라서 본 연구에서는 시행 착오법을 이용해 최적한 제어규칙을 설정하고 전자석들의 조정 범위를 한정시킴으로써 오실레이션 문제를 해결하였고, 지역 최소문제는 유전자 알고리즘을 사용하여 피할 수 있도록 하였다.

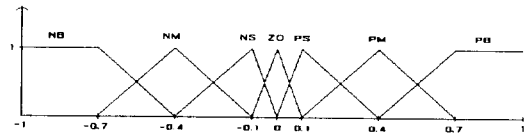


그림 5 빔 오차에 대한 언어적 분할
Fig. 5 Linguistic expression of beam error

퍼지 추론시스템(fuzzy inference system)의 입력은 이온빔 계측기에서 측정된 출력값과 목표값에 대한 빔의 오차를 이용하였으며 세부적으로 빔 수송단 중심부에서의 편차와 빔 크기에 대한 편차로 구성된다. 출력은 각 전자석 전원공급장치의 전류값이다. 모든 퍼지 제어기는 두 개의 입력 X, Y를 사용하며 각각 7개의 언어적 표현으로 분할된다. 즉, Positive Big(PB), Positive Medium(PM), Positive Small(PS), Zero(ZE), Negative Small(NS), Negative Medium(NM), Negative Big(NB)으로 나뉜다. 그림 5는 4극 전자석의 경우에 빔 오차에 대한 언어적 분할을 나타냈다.



그림 6 실제 이온빔의 단면 모양(X축 조정 전)
Fig. 6 Shape of ion beam (Before modification of X axis)



그림 7 실제 이온빔의 단면 모양 (X축 조정 후)
Fig. 7 Shape of ion beam (After modification of X axis)

제어규칙은 싸이클로트론 운전자의 제어 경험을 참조하는데, 이를 살펴보면 실제 이온빔의 단면 모양을 나타낸 그림 6과 같이 X축의 빔 모양이 Y축에 비하여 상대적으로 큰 경우, X축만을 제어하여도 그림 7과 같이 Y축의 크기에 영향을 미친다는 것이다. 이에 따라 운전자는 Y축에 대하여 X축이 약간 큰 경우 X축만을 제어하여도 X축뿐만

아니라, Y축에도 제어효과를 갖는다. 따라서 이런 점들을 고려하여 싸이클로트론 빔 라인에 장착되어 있는 4극 전자석의 경우에 표 1과 표 2와 같이 2-입력 1-출력 퍼지 시스템으로 제어규칙을 작성하였다.

퍼지 제어시스템에 대한 설계과정의 일반성을 얻기 위해서 입출력은 [-1, 1]로 정규화 하였으며, 입력(X, Y)에 대한 퍼지 추론의 소속값은 MIN-MAX추론 방법을 사용하였다. 또한 비퍼지화 방법은 무게 중심법이 사용되었다. 입력변수인 좌, 우의 X축과 상, 하의 Y축의 입력을 퍼지화하여 추론한 후에 결과 값을 비퍼지화하고 각각의 제어기에서는 제어값을 출력시키게 된다.

표 1 X축 제어규칙

Table 1 Fuzzy rule table of X axis

Y \ X	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	PM	PS	ZE	ZE	ZE	NS	NM
NM	PM	PS	ZE	ZE	ZE	NS	NM
NS	PB	PM	PS	ZE	NS	NM	NB
ZE	PB	PM	PS	ZE	NS	NM	NB
PS	PB	PM	PS	ZE	NS	NM	NB
PM	PM	PS	ZE	ZE	ZE	NS	NM
PB	PM	PS	ZE	ZE	ZE	NS	NM

표 2 Y축 제어규칙

Table 2 Fuzzy rule table of Y axis

Y \ X	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	PM	PM	PB	PB	PB	PM	PM
NM	PS	PS	PM	PM	PM	PS	PS
NS	ZE	ZE	PS	PS	PS	ZE	ZE
ZE	ZE	ZE	ZE	ZE	ZE	ZE	ZE
PS	NS	ZE	NS	NS	NS	ZE	ZE
PM	NS	NS	NM	NM	NM	NS	NS
PB	NM	NM	NB	NB	NB	NM	NM

3. 3 퍼지 제어기 선택을 위한 관리 부분 설계

싸이클로트론의 빔 라인은 각 패러데이컵을 기준으로 그림 8과 같이 이온 빔의 중심위치를 변화시키는 조정자석 X, Y와 이온 빔의 크기를 조정하기 위한 3개의 4극 자석 렌즈가 한 개의 블록으로 구성되어 있다. 싸이클로트론에는 이와 같은 블록이 전체 6개가 존재한다. 이중 하나의 블록을 제어하기 위해서 3bit×5의 유전자를 설정하였으며, 초기

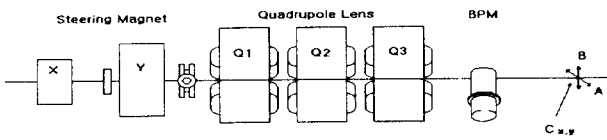


그림 8 빔 수송단의 구성
Fig. 8 Construction of beam line

개체군 설정은 실시간 제어를 고려, 최소화하도록 표 3과 같이 5개의 개체를 사용하였다.

표 3 전자석의 유전자 코드

Table 3 Coding of gene for power supply

X전자석		Y전자석		Q1전자석		Q2전자석		Q3전자석	
w_{11}	101	w_{12}	000	w_{13}	111	w_{14}	110	w_{15}	000
w_{21}	000	w_{22}	101	w_{23}	000	w_{24}	111	w_{25}	110
w_{31}	100	w_{32}	101	w_{33}	110	w_{34}	111	w_{35}	000
w_{41}	000	w_{42}	000	w_{43}	111	w_{44}	101	w_{45}	000
w_{51}	000	w_{52}	000	w_{53}	000	w_{54}	101	w_{55}	111

$$\begin{pmatrix} w_{11}w_{12}w_{13}w_{14}w_{15} \\ w_{21}w_{22}w_{23}w_{24}w_{25} \\ w_{31}w_{32}w_{33}w_{34}w_{35} \\ w_{41}w_{42}w_{43}w_{44}w_{45} \\ w_{51}w_{52}w_{53}w_{54}w_{55} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.71 & 0 & 1 & 0.86 & 0 \\ 0 & 0.71 & 0 & 1 & 0.86 \\ 0.57 & 0.71 & 0.86 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0.71 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.71 & 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

- 단, w_1 : X축 조정전자석에 대한 가중치
- w_2 : Y축 조정전자석에 대한 가중치
- w_3 : Q1전자석에 대한 가중치
- w_4 : Q2 전자석에 대한 가중치
- w_5 : Q3 전자석에 대한 가중치

식(3)에는 본 연구에서 사용된 초기 가중치를 나타냈는데, 유전 알고리즘의 진행 중 가중치가 0.5를 기준으로 낮은 경우에는 제어를 수행하지 않고, 가중치가 0.5보다 큰 경우에만 퍼지 제어를 선택하도록 하여 제어속도의 향상을 가져오도록 하였다.

싸이클로트론 제어기의 성능은 빔 수송단에 장착되어 있는 이온빔 단면 계측기에 의해 얻어지는 중심부에 대한 빔의 상대위치와 X, Y축 방향의 빔의 크기로 결정된다[16]. 그림 9는 이온빔 단면 계측기로부터 얻어지는 출력 데이터를 오실로스코프를 이용해 실측한 파형이다. 그림 9에서 $T_{x,y}$ 는 이온 빔의 중심부를 나타내고, $C_{x,y}$ 는 빔 라인의 중심부를 의미한다. 또한 X_b, Y_b 는 X, Y축에서 측정된 빔의 단면크기, X_c, Y_c 는 빔 중심부가 빔 라인 내부의 정 중앙에서 떨어진 정도를 나타냈다.

주어진 목표값과 이온빔 계측기에서 실측된 데이터의 차이를 식(4)와 같이 오차로 정의했다. 여기서 X_{be}, Y_{be} 는 X, Y축 방향의 빔 크기에 오차를 의미하고, X_{ce}, Y_{ce} 는 빔 라인 중심부에서 벗어난 오차를 의미한다.

$$\begin{aligned} X_{be} &= X_{bref} - X_b \\ Y_{be} &= Y_{bref} - Y_b \\ X_{ce} &= X_{cref} - X_c \\ Y_{ce} &= Y_{cref} - Y_c \end{aligned} \quad (4)$$

단, X_{bref}, Y_{bref} : X, Y축에 설정된 빔 단면 크기의 목표값
 X_{cref}, Y_{cref} : X, Y축에 설정된 빔 중심부 위치의 목표값

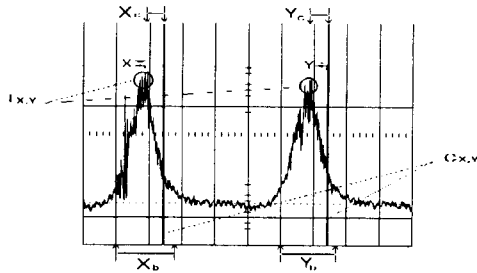


그림 9 외부 입력 값의 분석
 Fig. 9 Analysis of external input value

또한 평가지표로 사용될 적합도 함수는 다음과 같이 설정하였다.

$$Fitness(j) = \frac{1}{1+H} \quad (5)$$

여기서, j 는 j 번째 개체를 나타내며, H 는 음수가 아니기 때문에 H 가 최소값일 때 최대의 적합도 함수를 얻을 수 있다. H 값은 다음과 같이 정의하였다.

$$H = |X_{be}| + |Y_{be}| + |X_{ce}| + |Y_{ce}| + A_{w_1 w_2 w_3 w_4 w_5} \text{ (제한조건)} \quad (6)$$

단, A : 상수 값

본 연구에서 수행되는 제어는 현재의 계측 자료를 이용한 실시간 제어로서 X축의 이온빔 크기를 결정하는 조정 전자석 Q1, Q3가 동시에 선택되어 제어가 진행될 경우, 현재의 X축에 대한 제어가 Q1과 Q3 전자석에 모두 적용되어 원하는 출력 결과를 얻을 수 없다. 따라서 제안된 제어기에서는 Q1과 Q3가 모두 선택될 경우를 대비하여 가중치 크기에 의해 제어순서를 결정하도록 하였다. 만일 한 개체 내에서 동일한 크기의 가중치가 발생하면 Q1, Q2, Q3, X, Y의 순서로 처리한다. 그러나 Q1, Q3 전자석은 제어 순서에 의해 Q1, Q3의 출력값이 상호 영향을 받게 되므로 동일 가중치에서 순서를 미리 결정할 수가 없다. 이를 방지하기 위해서 제한 조건 $A_{w_1 w_2 w_3 w_4 w_5}$ 를 표 4와 같이 사용하였다. 여기서 $A = 10000$ 인 상수값이다.

표 4 동일 가중치 발생 제한조건
 Table 4 Restrict item for the same weight outbreak

내용	w_1	w_2	w_3	w_4	w_5
Q1, Q3가 동일한 유전자를 갖는 경우	×	×	○	×	○

○: 동일 가중치 발생, ×: 해당 없음

식 (5)를 이용하여 적합도 값을 발생시키고 제안된 방식에 따라 관리부분을 변경하며, 선택에는 엘리티즘(elitism) 방식을, 교배는 일점교배 방식을 사용하였다. 표 5에는 본 연구에서 사용된 유전자 파라미터 값들을 명기하였다.

표 5 유전자 파라미터
 Table 5 Parameters of genetic

파라미터	파라미터 값
전체 집단의 크기 (Total population size)	5
각 개체의 길이 (Chromosome length)	15
교배확률 (Crossover rate)	0.4
돌연변이 확률 (Mutation probability)	0.05

4. 지능형 제어기 실험 및 결과 고찰

본 연구에서 제안한 지능형 제어기의 성능은 MC-50 싸이클로트론의 빔 라인 중 FC1위치에 실제 적용하여 우수성을 검증하였다. 그림 10에는 실험에 사용된 전체적인 H/W장치를 나타냈는데, 크게 VXIBus 시스템, XY 전자석, Q1~Q3 전자석, 이온 빔 단면 계측기(BPM)로 구성되어 있다.

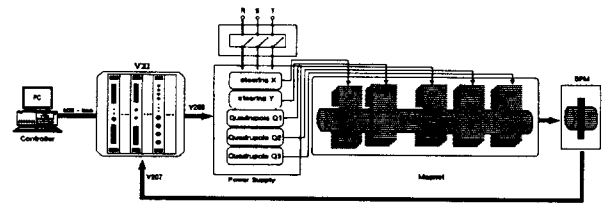


그림 10 전체적인 H/W 구성
 Fig. 10 Construction of Hardware device

VXIBus 시스템은 메시지 베이스(message base) 방식 혹은 레지스터(register) 방식으로 이용될 수 있는데, 본 실험에서는 빠른 데이터 입출력을 위해 레지스터 방식을 이용하였다. 또한 VXIBus 시스템을 사용하기 위해서는 메인프레임에 설치되어 있는 각각의 모듈을 사용자의 사양에 맞게 설정해야 하는데 본 실험에서는 LabWindows/CVI를 이용하였고, 지능형 제어 알고리즘도 LabWindows/CVI 언어를 이용해 프로그래밍 하였다[17].

이온 빔 단면 계측기(BPM)내의 텅스텐 선에서 획득되는 전류는 2 μ A정도의 매우 작은 값이므로 가변형 증폭기 형태의 전류-전압 변환기를 통과해 0~10V까지의 전압으로 V207모듈로 인가된다. 한 주기당 3000번 샘플링된 전압은 V207모듈과 VXIBus를 통해 PC(Pentium II 333)로 전달된다. PC에서는 입력된 데이터를 이용해 적합도를 계산하고, 유전 알고리즘에 의해 퍼지 제어를 선택한다. 비퍼지화된 출력은 VXIBus의 D/A변환 모듈인 V206을 통하여 전자석 전원 공급장치로 제어전압을 공급하고, 전자석 전원 공급장치들은 해당하는 전류값을 각 전자석들에 공급한다. 이때 제어전압의 출력간격은 전원공급기의 감폭시간 고려하여 0.5

초로 하였다. 그림 11은 제시된 제어기를 MC-50 싸이클로 트론에 실제 적용하였을 때 이온 빔의 오차의 수렴 정도를 나타냈다. 임의의 초기값(X=0A, Y=0A, Q1=8A, Q2=23A, Q3=19A)에서 목표값(빔 크기)을 X축=17.5mm, Y축=17.5mm로 주었을 경우 각 세대의 최대 적합도에서 오차 수렴 정도를 나타냈는데, 여기서 오차(e)는 식(7)과 같이 정의하였다.

$$e_x = ref_x - (|X_{be}| + |X_{be}|)$$

$$e_y = ref_y - (|Y_{ce}| + |Y_{ce}|) \tag{7}$$

단, e_x : X축의 오차, ref_x : X축의 목표값
 e_y : Y축의 오차, ref_y : Y축의 목표값

실험을 수행한 결과 최종 수렴값은 X=0.375893[A] Y=0.116432[A] 되었고, 그림에서 알 수 Q1=17.928291[A] Q2=26.791063[A] Q3=18.483756 [A]로 얻어졌으며 수렴시까지 47.5초가 소요되었고,

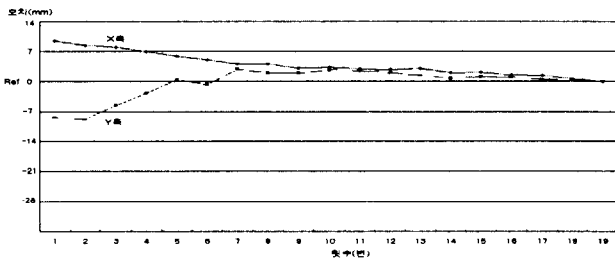


그림 11 이온 빔 오차의 수렴정도(X=17.5mm, Y=17.5mm)
 Fig. 11 Convergence of ion error (X=17.5mm, Y=17.5mm)

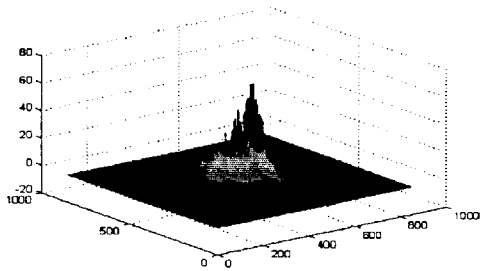


그림 12 3차원적인 빔 분포 (1번째 데이터)
 Fig. 12 Beam distribution of 3D (first data)

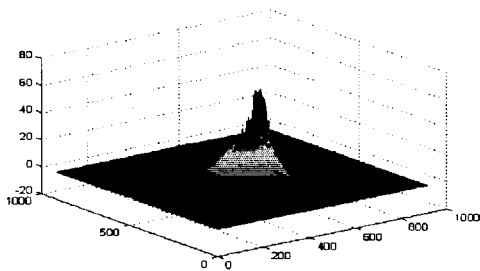


그림 13 3차원적인 빔 분포 (6번째 데이터)
 Fig. 13 Beam distribution of 3D (sixth data)

그림에서 알 수 있듯이 수렴 값은 계측기의 허용오차 ± 0.35mm내에 도달함을 알 수 있어 만족할 만한 수렴 성능을 보이고 있음을 알 수 있다. 그림 12, 13, 14는 이 경우의 이온 빔의 단면 모양을 1번째, 6번째, 19번째 데이터를 이용해 3차원적으로 표현하였다. 그림에서 알 수 있듯이 제어가 진행됨에 따라 빔의 모양이 원형으로 변함을 볼 수 있다.

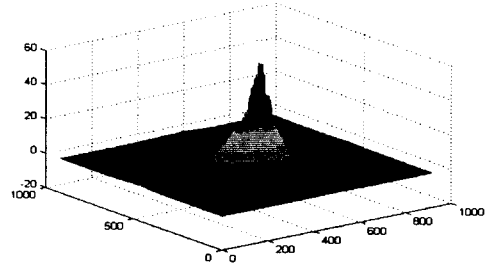


그림 14 3차원적인 빔 분포 (19번째 데이터)
 Fig. 14 Beam distribution of 3D(nineteenth data)

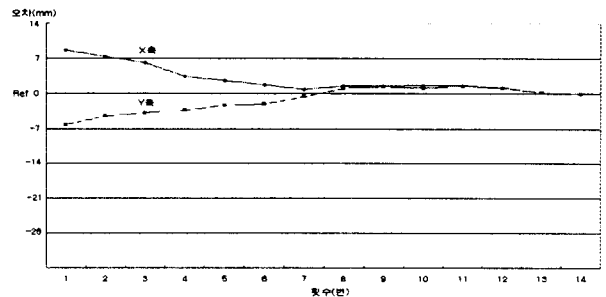


그림 15 이온빔 오차의 수렴정도 (X=17.5mm, Y=17.5mm)
 Fig. 15 Convergence of ion beam error

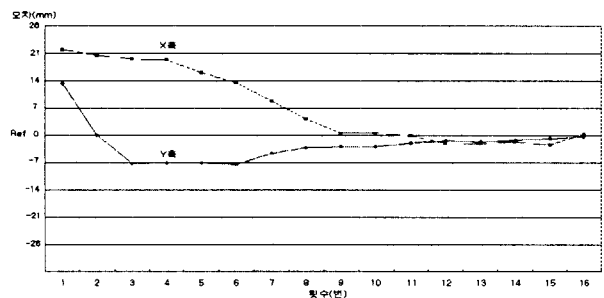


그림 16 이온빔 오차의 수렴정도 (X=14mm, Y=14mm)
 Fig. 16 Convergence of ion beam error

그림 15는 초기값을 X=0.1[A], Y=0[A], Q1=10[A], Q2=20[A], Q3=20[A]로 설정하고, 목표값을 X축=17.5mm, Y축=17.5mm로 주었을 경우에 오차의 수렴 정도를 나타냈다. 이 경우는 그림 11과의 동일한 목표값에 대하여 전자석들의 초기값만을 다르게 설정한 경우인데, 이 실험 결과도 14번째 이후는 오차가 거의 0로 수렴됨을 알 수 있다. 따라서 싸이클로트론의 운전에서 일상적으로 사용되는 전자석들의 특정 초기값에 대해서 빔을 포커싱하는 용도로 사용할 수 있음을 확인할 수 있었다.

그림 16은 전자석의 초기값을 $X=0.1[A]$, $Y=0[A]$, $Q1=15[A]$, $Q2=15[A]$, $Q3=15[A]$, 목표값을 X 축=14.0mm, Y 축=14.0mm로 설정한 경우인데 그림과 같이 19번째에 오차 범위 내에 수렴함을 확인할 수 있었다.

그림 17은 싸이클로트론을 수동 운전하는 경우와 제안된 제어기를 이용하는 경우를 시간 축을 이용해 비교한 그림이다. 두 경우 모두 빔 크기의 목표값은 X 축 = 14mm, Y 축 = 14mm로 설정하였고, 전자석의 초기 상태는 동일하게 유지하였다. 또한 X 축과 Y 축을 동시에 주어진 오차에 수렴하도록 실험을 수행하였다. 실험 결과는 그림 17에 나타냈듯이 X 축, Y 축의 빔 모양은 수동 운전 시는 약 48.5초, 자동 운전 시는 약 38초만에 주어진 목표값에 수렴됨을 알 수 있어 실용적으로 응용 가능성을 확인할 수 있었다.

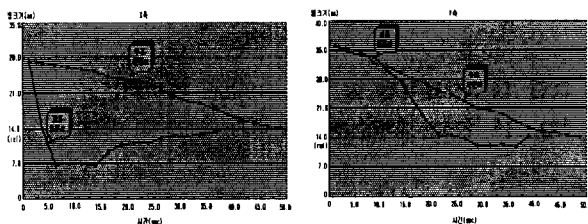


그림 17 제어기의 출력 비교 ($X=14mm$, $Y=14mm$)
 Fig. 17 Comparison of controller output ($X=14mm$, $Y=14mm$)

5. 결 론

본 연구에서는 싸이클로트론의 자동화를 위해 퍼지 제어와 유전자 알고리즘을 복합적으로 이용한 제어기를 설계했고, MC-50 싸이클로트론의 빔 라인에 실제 적용하였다. 이온 가속기인 싸이클로트론은 많은 입출력 변수가 상호 연관되어 있기 때문에 운전자의 능력에 의해 이온빔 조정이 크게 좌우되는 단점을 갖고 있다. 또한 실용적인 이온빔의 제어는 동위원소(radio isotope)표적장치 크기의 $\pm 2mm$ 내에서 오차를 유지해야만 한다. 디포커싱의 경우는 빔 라인의 방사화(radioactive)를, 포커싱의 경우는 표적장치의 열화를 가져오기 때문이다. 제안된 제어기는 여러 번의 반복 실험을 통해 알 수 있듯이 $\pm 0.35mm$ 내에서 오차가 수렴하기 때문에 싸이클로트론의 빔 조정에 실용적으로 적용 가능성을 입증하였다. 본 연구에서는 MC-50 싸이클로트론 6개의 빔 라인 블록 중에서 하나의 블록만을 이용하여 제어기의 성능을 확인하였는데, 모든 빔 라인 블록에 확대 적용하는 것이 향후 연구과제로 남는다.

감사의 글

본 연구는 1999년도 과제번호 50067-99, 과제명의료용 싸이클로트론 가속기 개발의 원자력 중장기 지원에 의하여 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사드립니다.

참 고 문 헌

[1] R. Westervelt, W. Klein, "Framework for a General

Purpose, Intelligent Control System for Particle Accelerators", Proceeding of the Particle Accelerator Conference and International Conference on High Energy Accelerators, IEEE, pp.2175-2177, May, 1995.

[2] J. S. CHAI, Y. S. KIM AND K. H. KWON, "Beam Transport System using Fuzzy Controller in the KCCH Cyclotron", Cyclotrons and Their Applications, Proceedings of the 14th International Conference, pp.310-313, 1996.

[3] S. Clearwater and W. Cleland, "A Real-Time Expert System for Trigger Logic- Logic Monitoring", Proceedings of International Conference on Accelerator and Large Experimental Physics Control System, November, 1989.

[4] D. Nguyen and M. Lee, "Accelerator and Feedback Control Simulation Using Neural Networks", SLAC-PUB-5503, May, 1991.

[5] D. Schultz, "The Development of an Expert System to Tune a Beam Line ", Proceedings of International Conference on Accelerator and Large Experimental Physics Control System, November, 1989.

[6] S. Kundu and J. Chen, "Design of Heuristic Fuzzy Controller", Fifth IEEE Int. Conf. on Fuzzy Systems, pp.2130-2134, 1996.

[7] H. Ishibuchi, K. nozaki and H. Tanaka, "Efficient fuzzy partition of pattern space for classification problem," Fuzzy sets and Systems. vol. 59, pp.295-304, 1993.

[8] E. H. Mamadani, "Application of fuzzy logic to approximate reasoning using linguistic synthesis", IEEE Trans. Computer, Vol.C-26, no12, pp.1182-1191, 1977.

[9] L. Chambers, Practical Handbook of Genetic Algorithms, Applications Volume I, CRC Press, 1995.

[10] K. Kristinsson and G. Dumont, "System identification and control using genetic algorithm", IEEE Trans. System, Man, Cybernetics, vol 22, no. 5, pp.1033-1046, 1992.

[11] J. R. Koza, Genetic programming, MIT press, 1993.

[12] Robot T. Cleary, "A New CAMAC and VXIBus High Performance High Performance Highway Interconnect", IEEE Transation on Nuclear Science, Vol. 44, No. 3, pp.393-397, June, 1997.

[13] E. J. Barsotti, "The new VME64 Extensions Standard, Related VSO and IEEE Standards & VME International Physics Association(VIPA) Activities", Nuclear Science Symposium, Anaheim, CA, Nov. 3, 1996.

[14] W. R. Hwang and W. E. Thompson, "Design of intellegent fuzzy logic controllers using genetic algorithms", Proc. of Third IEEE int. conf. on Fuzzy systems, pp.1383-1388, 1994.

[15] 채중서, 김유석 "MC-50 싸이클로트론 운영", KAE-

RI/MR-298/97, pp. 77-79, 과학기술처, 1997.

[16] 김유석, 이한석, 채종서, 권기호 "VXI 시스템을 이용한 이온빔 단면 계측 장치의 개발", 대한 전기학회, 제47권 제7호 pp979-984, 1998.

[17] LabWindows/CVI, National Instruments Corporation, 1996.

저 자 소 개



김 유 석(金 裕 錫)

1965년 10월 19일생. 1991년 성균관대 전자공학과 졸업. 1993년 동 대학원 전자공학과 졸업(석사). 1999년 동대학원 전자공학과 졸업(공학). 1993년~현재. 원자력연구소 싸이클로트론 응용연구실 선임 연구원

Tel : 02-970-1332, Fax : 02-970-1332

E-mail : unison@kcchsun.kcch.re.kr



채 종 서(蔡 鐘 緒)

1959년 8월 15일생. 1982년 성균관대 전자공학과 졸업. 1985년 동대학원 전자공학과 졸업(석사). 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1990년~1991년 IAEA 핵 계측 장비한국측 조정자. 1994년 벨기에 브뤼셀 자유대 객원 연구원. 1995년 미국 LBNL 객원 연구원. 1999년 일본 이화학연구소 초빙연구원 1983년~현재 원자력연구소 싸이클로트론 응용연구실 선임 연구원. 1991년 ~현재 원자력 중장기개발과제 책임자.

Tel : 02-970-1331, Fax : 02-970-1332

E-mail : jschai@kcchsun.kcch.re.kr



조 영 호(曹 永 鎬)

1973년 8월 1일생. 1996년 성균관대 공대 전기공학과 졸업. 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업. 현재 동 대학원 전기전자컴퓨터공학부 박사과정

Tel : 0331-290-7167, Fax : 0331-290-7101

E-mail : choyh@ece.skku.ac.kr



권 기 호(權 奇 浩)

1975년 성균관대 전자공학과 졸업. 1978년 서울대 대학원 전자공학과 졸업(석사). 1978년~1980년 ETRI. 1988년 서울대 대학원 전자공학과 졸업(공학). 1996년 Texas A&M 교환교수. 1989년~현재 성

균관대 전기전자컴퓨터 공학부 교수