濟州大學校 産業技術硏究所 論文集, 第8卷, 1號, pp.86~92, 1997. 6
Cheju National Univ. R.I.I.T. Jour., Vol.8. No.1, pp.86~92, 1997. 6

유전 알고리즘을 이용한 노심내 출력분포 최적화

김 휴 찬* · 조 경 호** · 이 윤 준**

Optimization of Nuclear Reactor Power Distribution Using Genetic Algorithm

Hyu-Chan Kim*, Kyung-Ho Cho** and Yoon-Joon Lee**

ABSTRACT

A computer code named 'MGA_SCOUPE' has been developed to determine an optimal fuel-loading pattern for the nuclear reactor. The optimization goal in this code is (1) the minimization of the deviations in the power peaking factors both at BOC and EOC, and (2) the maximization of the average burnup ratio at EOC of the total fuel assemblies. The developed code automatically performs lots of searches for the globally optimum solution based upon the Modified Genetic Algorithm(MGA).

Through the application of the MGA_SCOUPE to the KORI 4-4 cycle reactor model, we have obtained a new better fuel loading pattern compared with the ones obtained by the existing codes such as SCOUPE and ROCS. Among the several satisfactory results, two dominant improvements can be summarized as follows:

- The avg. burnup ratio can be relatively increased by approx. 45%, and
- The standard deviation of the power peaking factor of the reactor both at BOC and EOC can be relatively reduced by approx. 25.8% and 18.7% respectively.

In addition to the technical improvements as above, the MGA_SCOUPE has removed the user-dependency problem occuring at the SCOUPE in the optimal loading pattern searches, and made the searching process fully automated.

Key words : Genetic algorithm, Reactor power distribution, Optimal fuel-loading pattern

I. 서 론

원자로내 핵연료 집합체의 배치는 발전소의 경제적 운영 및 노심의 안전성 등과 관련해서 가

* 제주대학교 대학원
Graduate School, Cheju Nat'l Univ.
** 제주대학교 에너지공학과
Dept. of Nuclear and Energy Eng., Cheju Nat'l Univ.

장 중요한 문제이며, 이에 대한 연구가 꾸준히 진행되고 있다. 그러나, 안전 조건을 만족시키면서 동시에 핵연료의 사용주기를 극대화화기 위하여는 핵연료의 복합주기 (Multi-Cycle) 분석이 필요하지만, 연소도(burnup ratio), 가연성 독물질(burnable poison)의 농도 및 분포 등 원자로에 작용하는 제반요소들을 최적화 과정에서 모두 고려한다는 것은 매우 어려운 일이다.

핵연료 최적 배치문제에 대한 기존의 연구방법들은 (1) 노심의 최적 핵연료 배치문제를 일련의 행렬식에 의한 고유치 문제로 전환시켜 해결하고자 하는 방법과[1], (2) 핵연료 장전 모형 변화에 따른 핵특성 변화에 대한 민감도 계수를 도입하여 최적 핵연료 배치 형태를 예측하는 방법[2-3], (3) 시행착오(trial and error)를 거듭하면서 습득된 기존 가압경수로의 설계-운전 경험을 토대로한 경험적 장전모형 탐색방법[4-7] 및 (4) 핵연료 장전 모형 설계에 대한 경험적 자료의 학습을 통하여 최적 핵연료 배치 형태를 탐색토록하는 신경망 이론, 또는 전문가 시스템[8-10]을 이용하는 방법 등으로 분류할 수 있다. 이중에서 경험적 장전모형 탐색방법은 설계자의 판단에 크게 좌우된다는 단점이 있고, 신경망이론 혹은 전문가 시스템에 의한 방법은 신형원자로와 같이 핵연료 장전모형 설계경험이 부족하거나 설계경험을 전혀 얻을 수 없는 원자로에 대하여는 적용하기 어렵다는 단점이 있다[11].

핵연료의 노심 배치 형태를 최적화하기 위하여 개발된 전산코드로는 NEMSNAP Code와 최근에 개발된 FORMOSA-P Code 및 CIGARO Code가 있다. 이중에서 NEMSNAP Code는 기존의 가압경수로에 주로 사용되어 왔고, FORMOSA-P Code는 1980년대 후반에 개발된 최적해 탐색 알고리즘인 SA(Simulated Annealing) 알고리즘[12]에 의거하여 FORTRAN 언어로 작성된 코드이다. CIGARO Code는 1990년대 초반에 들어와서 최적해 탐색 알고리즘으로서 여러분야에서 좋은 결과를 보이고 있는 유전 알고리즘(Genetic Algorithm, GA)[13]에 의거하여 개발된 코드이다. 이밖에도 대표적인 노심설계코드로 CE의 ROCS, Westinghouse의 ANC, Siemens의 MEDIUM 및 Studsvik의 SIMULATE가 있다.

본 연구에서는 MIT 대학에서 개발되고 현재 경희대학교에서 수정·보완하여 사용중인 SCOUPE[14]라는 노심 해석 코드의 기능을 GA의 전역 최적해(global optima) 탐색기능을 사용·보완하여 최적의 핵연료 배치모형을 자동으로 탐색할 수 있는 전산코드를 개발하였으며, 고리 4호기의 4주기 핵연료 배치모형의 탐색에 적용하여 개발된 코드의 작동성능을 평가하였다. 여기서, 최적의 핵연료 배치모형이라 함은 주어진 구속 조건하에서 노심 출력 분포의 균질화와 더불어 노심평균 출력분포를 최대화시킬 수 있는 최적의 핵연료 장전모형을 의미한다.

II. 최적해 탐색 알고리즘 및 프로그램 개요

2.1 유전 알고리즘(Genetic Algorithm, GA)의 개요

GA는 1975년 Holland와 그의 연구진들이 기존의 유전 알고리즘에 대한 연구를 종합하여 체계화시킨 이래 별다른 관심을 불러일으키지 못하다가, 1980년대 초반에 Goldberg[15]가 가스 송수관의 최적 운전모형 산출에 적용하여 좋은 결과를 얻은 이후로 여러분야의 최적해 탐색문제 해결의 좋은 도구로 사용되기 시작하였다.

GA는 다아윈이 주장한 자연 진화의 기본 법칙인 적자생존(survival of fittest)과 자연도태(natural selection)의 원리를 토대로 하여 정립된 최적해 탐색 알고리즘이다. 다시 말해서, GA에서는 대부분의 생명체들은 그들이 처한 환경에 적합한 형질을 가진 개체(individual)가 보다더 큰 생존 확률을 가지며, 교배(crossover)와 변종(mutation)의 과정을 통하여 더 좋은 방향으로 개체의 형질이 진화해 나가고, 부적합한 형질의 개체들은 진화의 과정에서 점차 도태된다는 자연진화의 법칙을 원용하여 최적해를 탐색한다.

Table 1 Analogy between optimization problem and genetic algorithm

Optimization Problem	Genetics Algorithm
Cost	Fitness
Solution Sub-Space	Population
Feasible Solutions	Individuals
Variables	Encoded String

Table 1은 일반적인 최적화 문제와 GA의 상사성을 나타낸 것으로서, GA에서는 목적함수 값과 제한 조건의 위반 정도에 따라 각 개체에 적합성 혹은 적응도(fitness)를 부여한다. 적합성이 큰 개체일수록 다음 단계인 교배와 변종의 과정에 참여할 확률이 커져서 세대교체가 진행될수록(최적해 탐색과정이 진행될수록) 전체 개체들의 유전형질은 좋은 방향으로 개선된다. 종래의 최적해 탐색 알고리즘과 비교하여 볼 때 GA는 다음과 같은 측면에서 다른 특징을 보여준다[16]:

- ▶ GA는 gradiant, hessian 등과 같은 시스템에 대한 추가적인 정보를 필요로 하지 않고 시스템변수 집합만을 이용하여 탐색작업을 수행한다. 이에 따라 시스템변수 사이의 coupling에 거의 무관하게 해공간(solution space)을 탐색할 수 있다.
- ▶ GA에서의 탐색은 solution-by-solution 탐색(point search)이 아니라 해집단(population) 내에서의 여러 해에 대한 동시 병렬 탐색(concurrent parallel search)이다. 이는 단순한 탐색 횟수의 증가뿐만 아니라 현재의 탐색 단계까지 누적된 정보의 이용 가능성을 효과적으로 높이는 것을 의미한다.
- ▶ GA는 결정론적인 탐색법(deterministic search)이 아닌 확률론적인 탐색(probabilistic search) 법을 사용한다.
- ▶ GA의 탐색은 항상 목적 함수가 개선되는 방향으로 만의 탐색을 수행하는 것이 아니라 목적 함수가 악화되는 방향으로의 탐색도 확률적으로 허용하기 때문에 국지해(local optima)에서 탈출하여, 전역 최적해에 도달할 확률이 높은 탐색방법이다.

2.2 GA를 이용한 최적의 장전모형 탐색

앞에서도 언급된 바와 같이 본 연구에서의 최적의 장전모형 탐색이라 함은 노심 출력 분포의 균질화와 더불어 노심평균 출력분포를 최대화시킬 수 있는 최적의 핵연료 장전모형을 찾는 것을 의미한다. 이러한 최적해 탐색문제를 본 연구에서는 GA를 이용하여 다음과 같이 정식화하였다.

Find loading pattern X to maximize

$$fitness(X) = \sum_{i=1}^{3} W_i \cdot r_i(X)$$

where,

X : arbitrary loading pattern(candidate solution in MGA_SCOUPE)

W_i : weighting factor

r_i : relative improvement of X compared with X^s

X^s : best loading pattern obtained by SCOUPE

여기서, 실제 사용된 W_i 및 r_i는 다음과 같다.

$$W_1 = W_2 = 1.0, \quad W_3 = 0.1$$

$$r_1(X) = \frac{\sigma_{BOC}(X^s)}{\sigma_{BOC}(X)}$$

$$r_2(X) = \frac{\sigma_{EOC}(X^s)}{\sigma_{EOC}(X)}$$

$$r_3(X) = \frac{avg.\ burnup\ ratio\ at\ EOC\ for\ X}{avg.\ burnup\ ratio\ at\ EOC\ for\ X^s}$$

$\sigma_{BOC}(X)$: standard deviation of power distribution at BOC for X

$\sigma_{EOC}(X)$: standard deviation of power distribution at EOC for X

2.3 노심 해석코드 및 프로그램 개요

핵연료 장전모형은 매우 다양하나 경제성과 안정성을 고려하여 가장 널리 쓰이고 있는 장전모형은 (1) Out-In Scatter Loading Pattern 과, (2) Low-Leakage Loading Patterns 등이 있다[17-18]. 첫 번째의 장전모형은 오래 전부터 사용되어온 방법으로 원자로의 반경방향 출력분포를 균질하게 할 목적으로 새 핵연료 집합체를 노심 바깥에 장전하고 일부 연소된 핵연료 집합체는 노심 안쪽부터 바둑판 형태로 장전하는 방법이다. 두 번째의 장전모형은 핵연료의 사용주기를 보다 길게 하고, 방사선 조사에 의한 원자로 압력용기의 취화문제를 완화시키기 위해 첨두출력 한계를 만족하는 한도내에서 새 핵연료 집합체를 노심 안쪽에 장전하는 방법이다.

본 연구에서 GA를 이용한 최적화 단계에서 필요로 하는 목적함수 계산 모듈을로는 SCOUPE라는 노심 해석 코드 중 일부를 수정하여 사용하였다. SCOUPE는 상기 핵연료 장전모형 중 저누출 장전모형에 근거하여 MIT에서 개발되고 현재 경희대학교에서 수정·보완하여 사용중인 노심 해석코드이다. 참고로, 저누출 장전모형에서는 노심 내부에서 첨두출력의 과도한 상승을 방지하기 위해 가연성 독물질의 적절한 적용이 요구되나, SCOUPE 코드에서는 이를 고려하지 않고 있다.

Fig. 1은 현재 SCOUPE의 개략적인 작업 흐름도이고, Fig. 2는 본 연구에서 GA를 이용하여 SCOUPE를 개선한 전산코드 MGA_SCOUPE의 개략적인 작업 흐름도이다. Fig. 1에서 볼 수 있듯이 SCOUPE에서의 장전패턴 탐색은 사용자의 경험 및 직관에 크게 의존하는 반복적 수동 탐색이다. 이에 반하여 Fig. 2의 MGA_SCOUPE 에서는 GA가 갖는 전역 최적해 탐색 능력을 이용함으로써 SCOUPE의 사용자에 대한 의존성을 가능한 배제토록 하였다. 또한, 수많은 장전 패턴의 생성 및 평가 작업이 GA를 통하여 일관되게 자동처리 되도록 하여 최종결과에 도달하기 위해 투여될 수작업 시간을 획기적으로 단축시켰다.

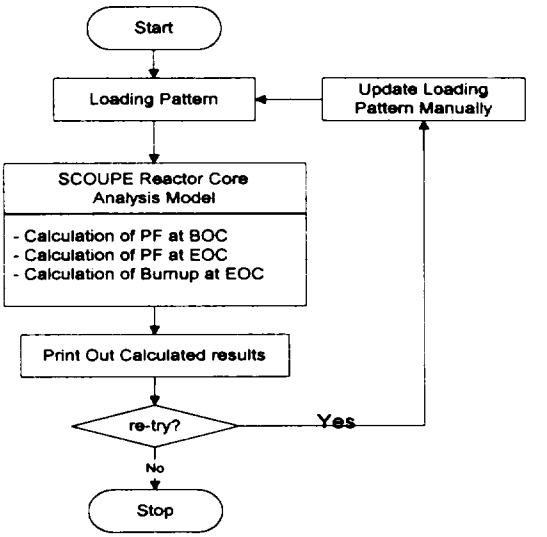

Fig. 1 Schematic flowchart of the SCOUPE

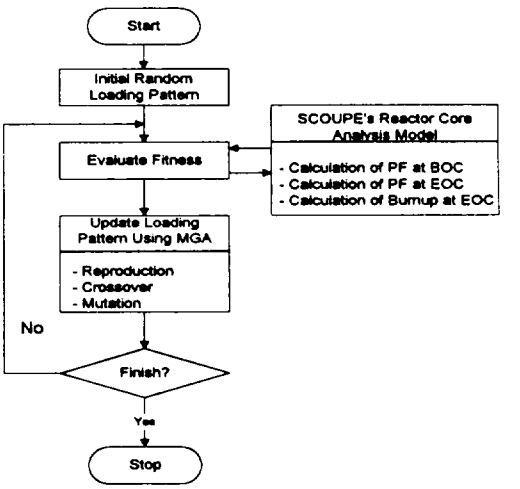

Fig. 2 Schematic flowchart of the MGA_SCOUPE

III. 핵연료 장전모형 탐색 결과 및 분석

본 연구에서 개발된 최적의 장전모형 탐색코

드(MGA_SCOUPE)의 작동성능을 평가하기 위하여 고리 4호기-4주기 모델에 대하여 MGA_SCOUPE로 얻은 결과를 ROCS의 결과 및 SCOUPE의 결과와 비교 분석하였다. 고리 4호기 원자로는 Westinghouse 사에서 설계한 2775MWt 급의 저누출 장전 노심이며, 4주기에서는 157개의 개량된 핵연료 집합체인 OFA(Optimized Fuel Assembly)를 사용하고 있다. 각 집합체는 17×17 배열의 264 핵연료봉과 24개의 안내관과 1개의 계측관으로 구성되어 있다.

연소도는 핵연료가 핵분열 반응에 의해서 그 단위 질량당 생성하는 열량으로 핵연료의 경제적 활용의 척도가 된다. 가압경수로의 경우 연소도는 우라늄 연료가 노심에서 발생한 총 열량을 노심에 장전할 때의 우라늄 무게(톤 단위)로 나눈 값, 즉 MWD/MTU (megawatt-days per metric ton of uranium)으로 통상 나타낸다. Table 2는 SCOUPE, ROCS 및 MGA_SCOUPE로 얻어진 최적의 핵연료 장전패턴에 따른 노심 평균연소도를 비교한 것으로서 MGA_SCOUPE에 의해 얻어진 장전패턴이 SCOUPE 및 ROCS의 결과 보다 약 45% 이상 증가한 노심 평균연소도를 보여 핵연료의 경제성을 증대시킬 수 있음을 보인다.

Table 2 Comparison of reactor core average burnup ratio

	SCOUPE	ROCS	MGA_SCOUPE
노심평균 연소도 (MWD /MTU)	10,075	10,500	14,956

Table 3은 SCOUPE, ROCS 및 MGA_SCOUPE에 의해서 얻어진 핵연료 장전패턴에 대하여 주기초, 주기말에서의 첨두출력인자(Power Peaking Factor, PF)의 분포를 비교한 것이다. 주기초에서 표준편차에 대한 비교를 보면, 최대값과 최소값의 차이도 작을 뿐 아니라 표준편차는 MGA_SCOUPE의 결과가 SCOUPE 및 ROCS의 결과 보다 상당히 작음을 알 수 있다. 주기말에서의 PF의 최대값과 최소값의 차이도 MGA_SCOUPE의 결과가 SCOUPE 및 ROCS보다 작게 나타났다. 이러한 결과는 MGA_SCOUPE로 얻어진 핵연료 장전패턴이 SCOUPE 및 ROCS에 의해 얻어진 장전패턴 보다 출력분포의 균질화면에서 보다 우수한 결과를 보인 것으로 평가된다.

Table 3 Comparison of power peaking factor

	SCOUPE		ROCS		MGA_SCOUPE	
	BOC	EOC	BOC	EOC	BOC	EOC
$\bar{\sigma}$ of PF	0.2958	0.2932	0.2903	0.2708	0.2194	0.2383
max PF	1.3393	1.2906	1.3160	1.3180	1.3914	1.3752
min PF	0.3526	0.3307	0.3450	0.3780	0.5894	0.5306
(max PF-min PF)	0.9867	0.9599	0.9710	0.9400	0.8020	0.8446

IV. 결 론

본 연구에서는 저누출 장전 모형에서 (1) 출력분포의 균질화 및 (2) 출력의 극대화를 위한 최적의 핵연료 장전패턴을 구하기 위한 전산코드(프로그램명 : MGA_SCOUPE)를 개발하였다. 최적의 장전패턴 탐색을 위한 탐색도구로는 최근 여러 분야에서 좋은 결과를 보이고 있는 유전 알고리즘을 본 연구분야의 특성을 고려하여 수정한 유전알고리즘(Modified Genetic Algorithm, MGA)를 사용하였다. 노심내 확산 방정식을 풀기 위해서는 MIT 대학에서 개발되고 경희대학교에서 수정 보완된 SCOUPE의 계산 모듈의 일부를 수정 사용하였다.

개발된 코드의 작동 성능을 검증하기 위하여 고리 4호기 4주기 모델에 대한 핵연료 장전패턴 탐색에 적용하여 기존 코드로 얻은 결과와 비교

한 결과 기술적인 면에서 다음과 같은 두가지 개선사항을 확인하였다. 즉, MGA_SCOUPE를 이용하여 새로이 탐색된 핵연료 장전패턴에 의하면

- ▶ SCOUPE 및 ROCS의 결과 보다 약 45% 이상 증가된 노심 평균연소도를 얻을 수 있어 핵연료의 경제적 사용을 더욱 증대시킬 수 있음을 보였다.
- ▶ SCOUPE 및 ROCS의 결과에 비해서 주기초, 주기말 첨두출력인자의 표준편차를 각각 25.8%, 18.7% 줄일 수 있어 원자로에서의 노심출력분포를 보다더 균질화 하여 원자로 운전의 안전성 확보에 기여할 수 있음을 보였다.

위의 기술적인 개선사항 이외에 MGA_SCOUPE는 기존의 SCOUPE 코드를 이용한 핵연료 장전패턴 탐색이 사용자의 경험 및 직관에 크게 의존하는 수작업 탐색이었던 것을 일괄적인 자동탐색작업으로 전환시킬 수 있게 하였다.

그러나, 본 연구에서 개발된 MGA_SCOUPE의 노심내 확산 방정식을 풀기 위한 계산 모듈은 주기초, 주기말에서의 출력 분포를 계산하는 과정에서 가연성 독물질을 고려하지 않고 있다. 향후 가연성 독물질을 고려하여 계산 모듈을 보완해야 할 필요성이 있다.

참 고 문 헌

1) T. Hoshino, 1972, In-Core Fuel Management Optimization by Heuristic Learning Technique, *Nucl. Sci. and Eng.* Vol. 49, pp. 59.
2) H. Motoda, 1975, Optimization of Refueling Schedule for Light Water Reactors, *Nucl. Tech.*, Vol. 25, pp. 477.
3) J. D. Mingle, 1975, In-Core Fuel Management via Perturbation Theroy, *Nucl. Tech.*, Vol. 27, pp. 248.
4) 김택겸, 1990, 경험칙을 이용한 가압경수로 최적장전모형 결정에 관한 연구, 서울대학교 석사학위논문.
5) A. Galperin and Y. Kimhy, 1991, Application of Knowledge-Based Methods to In-Core Fuel Management, *Nucl. Sci. and Eng.* Vol. 109, pp. 103.
6) A. Galperin, 1988, Application of Heuristic Search Method for Generation of Fuel Reload Configurations, *Nucl. Sci. and Eng.* Vol. 99, pp. 343.
7) A. Galperin, 1995, Exploration of Search Space of the In-Core Fuel Management Problem by Knowledge-Based Techniques, *Nucl. Sci. and Eng.* Vol. 119, pp. 144.
8) H. G. Kim and S. H. Chung, 1993, Pressurized Water Reactor Core Parameter Prediction Using an Artificial Neural Network, *Nucl. Sci. and Eng.* Vol. 113, pp. 70.
9) Zhian Li and S. H. Levine, 1994, An Automatic Optimal Pressurized Water Reactor Reload Design System with an Expert Module, *Nucl. Sci. and Eng.* Vol 118, pp. 67.
10) B. C. Back M. H. Kim, 1992, Two-Dimensional Power Distribution Calculation Model for PWR Shuffling Expert System, *Proc. of Spring Mtg. of KNS*, pp. 131, Pohang.
11) 김택겸, 1995, 혼합정수계획법에 의한 가압경수로 노심 핵연료관리 최적화 연구, 서울대학교 박사학위논문.
12) S. Kirkpatrick, C. D. Gerlatt, Jr., and M. P. Vecchi, 1983, Optimization by Simulated Annealing, *Science*, Vol. 220, pp. 671.
13) D. E. Goldberg, 1989, *Genetic Algorithm in Search Optimization &*

Machine Learing, Addison-Wesley Publishing Co., NY.

14) 백병찬, 김명현, 1990, Reactor Power Calculation Model for the Reloading Pattern Search Expert System, 경희대학교 레이저공학, Vol. 1, pp. 65~78.

15) D. E. Goldberg, 1983, *Computer-aided gas pipeline operation using genetic algorithm and rule learing*, Ph. D. Thesis, Dept. Civil Eng., Univ. of Michigan.

16) Kyung Ho Cho, Sung Tack Ko, and Han Seak Ko, 1996, A Proposal of New Method for EICT Image Reconstruction - A Hybrid Approach Using Genetic Algorithm and Newton-Raphson Method, 대한전자공학회, 제33권 B편 제4호, pp. 721~729.

17) 이창규, 1993, 노심핵설계 개요(원자로 물리 특강), pp. 39~53.

18) 박홍준, 1992, 최적제어기법과 경험칙을 이용한 최적핵연료 분포 결정 및 목적 출력을 통한 가연성 독봉의 추적에 관한 연구, 서울대학교 석사학위논문.