
碩士學位論文

遺傳 알고리즘을 이용한
노심내 出力分布 最適化

濟州大學校 大學院

에너지工學科



1996年 12月

遺傳 알고리즘을 이용한
노심내 出力分布 最適化

指導教授 趙慶鎬

金 然 贊

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

1996年 12月

金然贊의 工學碩士學位 論文을 認准함

審査委員長 이 한주
委 員 조 경호
委 員 천 원기

濟州大學校 大學院

1996年 12月

**Optimization of Nuclear Reactor
Power Distribution Using
Genetic Algorithm**

**Hyu-Chan Kim
(Supervised by Professor Kyung-Ho Cho)**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF MASTER OF
ENGINEERING**

**DEPARTMENT OF NUCLEAR AND ENERGY
ENGINEERING
GRADUATE SCHOOL
CHEJU NATIONAL UNIVERSITY**

1996. 12.

목 차

Summary	1
I. 서 론	3
1. 연구배경 및 목적	3
2. 기존의 최적화 연구	4
II. 이론적 배경	7
1. 유전 알고리즘의 개요	9
2. 유전 알고리즘의 작동원리	11
2.1 초기 세대 생성	13
2.2 평가(Evaluation)	14
2.3 도태(Reproduction)	15
2.4 변종 (Mutation)	16
3. 다른 최적화 알고리즘과의 비교	17
3.1 임의 탐색법(Random Search)	18
3.2 구배 탐색법(Gradient Method)	18
3.3 반복탐색법(Iterated Search)	18
3.4 시뮬레이티드 아닐링(Simulated Annealing)	19

Ⅲ. 최적의 장전모형 탐색 및 분석	20
1. 장전모형 및 노심 해석 코드	20
2. GA를 이용한 최적의 장전 모형 탐색 및 목적함수	24
3. 장전 모형 탐색 결과 및 분석	25
Ⅳ. 결 론	38
Ⅴ. 참고문헌	39



Summary

The main purpose of study is to develop a computer code named as 'MGA_SCOUPE' which can determine an optimal fuel-loading pattern for the nuclear reactor.

The developed code, MGA_SCOUPE, automatically lots of searches for the globally optimum solutions based upon the modified Genetic Algorithm(MGA). The optimization goal of the MGA_SCOUPE 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 ration at EOC of the total fuel assemblies.

For the reactor core calculation module in the MGA_SCOUPE, the SCOUPE code was partially modified and used. It had been developed originally in MIT and has been used currently in Kyung Hee University.

The application of the MGA_SCOUPE to KORI 4 - 4 Cycle Model show several satisfactory results. Among them, two dominant improvements compared with the SCOUPE code can be summarized as follow;

- The MGA_SCOUPE removes the user-dependency problem of the SCOUPE in the optimal loading pattern searches. Therefore, the searching process in the MGA_SCOUPE can be easily automated.

- The final fuel loading pattern obtained by the MGA_SCOUPE shows 25.8%, 18.7% reduced standard deviations of the power peaking factors both at BOC and EOC, and 45% increased avg. burnup ratio at EOC compare with those of the SCOUPE.

I. 서 론

1. 연구배경 및 목적

두차례의 석유파동 이후 추진된 탈석유정책에 의해 1978년 우리 나라 최초의 상업용 원자로인 고리 1호기를 건설하여 가동한 이후 현재 국내에서는 고리 1~4호기, 영광 1~4호기, 월성 1호기, 울진 1~2호기등 11기의 원자력 발전소가 운전 중에 있으며, 에너지 수요의 급속한 증가에 따라 향후 원자력에 대한 수요는 계속 증대될 전망이다. 이와 같이 원자력 발전소의 증가와 더불어 이와 관련된 업무는 더욱 더 많아지고 복잡화되고 있다. 특히 원자력 발전소에 장전되는 핵연료의 노심 설계는 현재의 3주기 발전소를 기준으로 했을 때 평균적으로 매달 새로운 주기에 대하여 설계 업무를 반복해야만 한다. 이러한 노심 설계라는 것은 계산과정이 복잡하고, 많은 시간과 비용, 많은 인력의 투입을 필요로 하고 있는 실정이다. 또한 원자력 발전소의 갑작스런 일시정지나 핵연료 집합체의 손상 등으로 인한 핵연료의 교체가 불가피하다면 핵설계 절차가 처음부터 이루어져야 함은 물론 경제적 시간적 손실 또한 상당할 것이다. 이런 면에서 볼 때 원자력에 대한 비중이 점차적으로 커짐에 따라, 원자로의 노심 관리의 최적화를 위해 상업용 원자로가 가동 된 이후부터 빠른 시간 안에 적은 비용으로 비교적 적은 오차를 내면서 정확한 노심 계산을 수행할 수 있는 방법론에 대한 연구가 진행되어 오고 있다. 대표적인 방법들로서는 선형 계획법(Linear Programming), 직접 탐색법(Direct Search Method), 동적 계획법(Dynamic Programming), Matching Algorithm등 다양한 방법들이 각기 나름대로의 최적화에 목표를 두고 시행되어 왔으나 실용화 단계는 들어서지 못했다(신호철, 1991).

원자력 발전소의 노심 설계에 있어서 1970년 및 80년대까지는 주로 안전성에 중점을 두었으나, 한정된 우라늄 자원의 효율적인 이용이라는 문제가 대두되면서 최근에는 원자력 발전을 이용한 전력 생산비용 중 핵연료 주기 비용이 커다란 부분을 차지하고, 앞으로 고갈될 우라늄 등 여러 가지 요인을 고려할 때, 노심 핵연료 관리(Reactor Core Fuel Management)의 개선이 절실히 요구되어진다.

최근에 새로운 노심 관리의 필요성에 따라 생명체의 자연 진화법칙을 일반 최적화 문제에 적용하는 방법인 유전 알고리즘(Genetic Algorithms, 이하 GA)이 새로이 시도되고 있다. 이 알고리즘은 다아윈이 주장한 자연 진화의 법칙인 적자 생존과 자연 도태의 원리를 토대로 정립한 최적화 알고리즘으로서 다음절에서 자세히 설명되어진다. GA를 이용한 최적 재장전 노심의 선정에 관한 연구는 아직 활발히 진행되고 있지는 않지만 앞으로 새로운 방법론으로 대두될 것으로 생각된다.

따라서 본 연구의 목적은 저누출 장전모형에서 최적핵연료 관리를 위해 노심 장전모형 결정 단계에서 GA를 이용한 핵연료 집합체의 최적 배치를 결정함에 있다.

2. 기존의 최적화 연구

각 주기에서 합리적인 결정을 통해 발전소 수명동안 핵연료에 드는 비용을 줄이고자 하는 노력들이 여러 가지 방법을 동원하여 시도되어 왔다. 안전 조건을 만족시키면서 동시에 주기길이를 극대화하기 위하여 복합주기(Multi - Cycle)의 분석이 필요하지만, 이러한 경우 문제가 복잡해져 컴퓨터의 기억용량과 계산 시간상의 문제가 뒤따르기 마련이다.

Suzuki와 Kiyose는 1주기 단위의 10주기 계산과 전체적인 최적화 계산의 비교에 근거하여, 핵연료의 소비에 있어서 1주기 단위의 최적화가 약 1% 정도의 오차로 전체적인 최적화와 근사함을 입증했다(박홍준, 1992). 따라서 실질적으로 평형주기에서 1주기 단위의 최적화는 전체적인 최적화를 대체할 수 있고, 문제를 다루기에 편리하므로 본 연구에서는 고리 4호기 4주기만을 연구대상으로 하였다.

원자로내 핵연료 집합체의 배치는 발전소의 경제적 운영 및 노심의 안전성 등과 관련해서 가장 중요한 문제이며, 이에 대한 연구가 꾸준히 연구가 지속적으로 진행되고 있다. 그러나 원자로에 작용하는 제반요소는 매우 복잡하여 이러한 요소를 반영할 수 있는 모든 인자를 최적화 시키는 것은 매우 어려운 일이다. 예를 들면 연소도(burnup), 가연성 독물질, 독물질의 분포 등 각종 변수들이 최적화 과정에서 고려되어야 할 요소들이다.

기존의 최적화 기법은 2차원 방정식을 근거로 노심의 최적 핵연료 배치문제를 일련의 행렬식에 의한 고유치 문제로 전환시키거나 또는 기존 가압경수로 설계 경험이나 운전 경험을 토대로 한 시행착오(trial and error)를 거듭하면서 주기길이나 안전성이 보다 뛰어난 장전 모형을 탐색해 나가는 경험적에 의한 방법, 핵연료 장전 모형 변화에 따른 핵특성 변화를 민감도 계수와 최적화 이론을 이용하여 수많은 핵연료 배치형태를 일일이 노심 핵설계 코드로 계산하지 않고도 최적핵연료 배치 형태를 예측하는 방법인 최적화 이론에 의한 방법, 핵연료 장전 모형 설계에 대한 경험적 자료를 설계자의 경험이나 기존의 장전 모형 설계 경험에 의존한다는 것보다 전산기가 스스로 학습을 통하여 체득해 가는 신경망 이론, 또는 전문가 시스템 방법 등 여러 알고리즘들이 소개되어 있다.

위에서 신경망이론, 전문가 시스템에 의한 방법이나 경험적에 의한 방법은 핵연료 장전모형 설계 경험이 부족한 원자로나 신형원자로와 같이 설계경험을 거의 얻을 수 없는 원자로에 대하여는 적용하기 어렵다는 단점이 있으며, 또한 설계자의 판단에 크게 좌우된다는 단점이 있다(김택겸, 1995).

가압경수로(Pressure Water Reactor - 이하 PWR)에서의 핵연료 관리의 노심 배치 형태를 최적화하기 위하여 여러 가지 방법들이 개발되어 왔다. 그 중에서 가장 널리 쓰이고 있는 것들이 국내에서는 신형원자로와 울진 3·4호기에 적용하기 위해 개발한 NEMSNA Code 와 열평형 상태에서의 몬테카를로 방법을 이용하여 최적화 문제의 목적함수로 사용하고 이것을 simulated annealing 방법에 적용하여 '최소값'을 찾는 FORMOSA-P Code, 그리고 근래에 들어와서 많은 관심의 대상이 되고 있는 GA(Genetic Algorithm) 이론에 독립적 Reactor Physics Interface를 이용하여 목적함수를 침투 출력 제한 근처에서 찾아내는 CIGARO(Code Independent Genetic Algorithm Reactor Optimize) System 등이 있다.

현재 국내에서 과거에는 노심 구조를 연료봉 크기까지만 균질화하여 푸는 미세 격자 유한 차분법을 노심 해석에 사용하였으나, 80년대에는 미세격자 유한 차분법의 정확도를 유지하는 중성자 확산 노달 방법의 개발에 따라 최근에는 대부분의 관련 연구소 및 회사, 학계가 2차원 유한차분법 대신에 3차원 노달 방법을 이용하여 노심 계산을 하고 있다. 대표적인 설계코드는 CE의 ROCS, Westinghouse의 ANC, Siemens의 MEDIUM, 그리고 Studsvik의 SIMULATE가 있다.

II. 이론적 배경

지금까지 최적화 문제를 풀기 위한 수많은 기법들이 제시되었으나, 그 중의 일부는 제한된 영역에서만 사용하기도 한다. 지금까지 개발된 최적화 기법을 분류하면, Fig.1 에서 보는 바와 같이 기울기(gradient)정보를 이용하는 방법, 임의 탐색(random search)에 의한 방법, 반복(enumerative)탐색에 의한 방법 등 세 가지로 나누어 볼 수 있다. 그 가운데 최근 들어 임의 탐색 방법 가운데 하나인 GA에 관한 관심과 연구가 증가되고 있다. GA는 Fig. 1 에서도 알 수 있듯이 목적함수나 구속 조건(constraint)에 구애받지 않고 다양한 문제에 적용 가능한 최적화 방법 중하나이다. GA는 목적함수를 미분할 필요가 없고, 제한 조건을 고려한 목적함수의 다양한 설계 및 적용이 매우 쉽기 때문에 최적화가 필요한 여러 분야에서 좋은 결과를 보이고 있다.



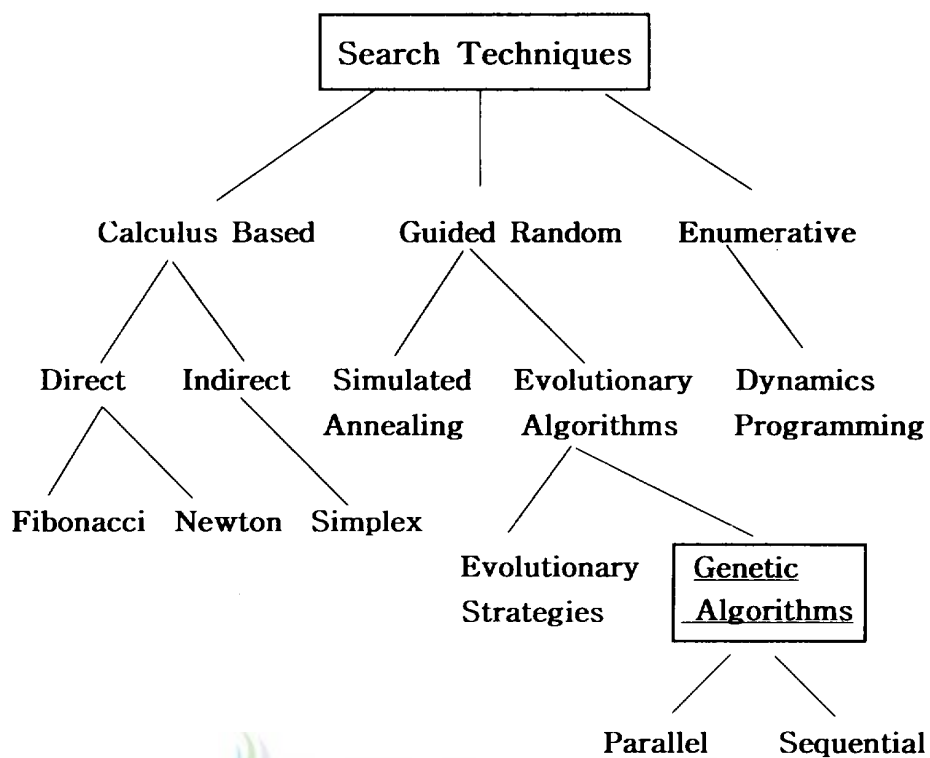


Fig. 1. General Optimization Techniques

1. 유전 알고리즘의 개요

유전 알고리즘은 1975년 Holland와 그의 연구진들이 기존의 유전 알고리즘에 대한 연구를 종합하여 체계화시켰으며, 공학 분야에서는 Goldberg에 의해 가스 송수관에 대한 최적 설계가 시도된 이래 끊임없는 발전이 이루어져 왔다.

GA는 다윈이 주장한 자연 진화의 법칙인 적자생존(survival of fittest)과 자연도태(natural selection)의 원리를 토대로 하여 정립한 최적화 알고리즘이다. 자연 진화의 법칙에 의하면 일정한 환경에 무리를 지어 살고 있는 생명체들은 그 환경에 적합한 형질을 가진 개체가 생존할 확률을 크게 가지며, 교배(Crossover)와 변종(mutation)의 과정을 통하여 더 좋은 방향으로 진화해 나가고, 부적합한 형질의 개체들은 진화의 과정에서 점차 도태되어 진다. 이와 같은 진화의 과정을 되풀이하면 결국 주어진 환경에 가장 적합한 형질의 개체들이 형성될 것이다.

GA는 이러한 생명체의 자연 진화 법칙을 일반 최적화 문제에 적용한 방법으로, 해석 영역에 다수의 개체들을 분포시켜 목적 함수값과 제한 조건의 위반 정도에 따라 각 개체에 적합성(fitness)을 부여한다. 개체의 적합성이 클수록 다음 단계인 교배와 변종의 과정에 참여할 확률을 다른 개체보다 크게 하여(reproduction), 적합성이 좋은 개체들이 다음 단계에 보다 많이 형성되어 계산이 진행 될 수록 전체 개체들을 적합성이 좋은 방향으로 탐색이 진행된다.

위에서 설명한 바와 같이 GA는 목적 함수(objective function)의 최적해를 발견하는 모의 진화형의 탐색 알고리즘으로 그 과정은 다음과 같이 요약할 수 있다.

1. 시스템 변수들을 이진수(0 과 1)로 구성된 하나의 유전자형(string)으로

- 표현되는 개체(individual)에 대응시키는 방법을 결정한다.
2. 단계 1로 정의된 개체를 무작위로 생성하여 초기 집단(initial population)을 구성한다.
 3. 집단내의 각 개체의 유전자형을 십진수의 표현형(phenotype)으로 바꾸어 각 개체의 적응도(fitness)를 평가한다.
 4. 적응도에 따라 적응도가 높은 개체를 선택, 복사하여 교배지(mating pool)를 구성한다.
 5. 교배지에서 교배에 참가한 개체쌍(parents)을 임의로 선정하여 이들의 유전자형을 교배시킴으로써 두 개의 자손(spring)을 생성한다.
 6. 일정한 돌연변이 확률로 자손의 유전자형을 변화시킨다.
 7. 단계 3~6을 개체 집단의 크기만큼 반복하여 새로운 세대 집단(population of new generation)을 구성한다.
 8. 실행 종료 조건이 반복될 때까지 위의 과정을 반복한다(되풀이한다).

GA는 다음과 같은 측면에서 종래의 최적화 알고리즘과 다른 특징을 보여준다.

1. GA는 시스템 변수 집합을 코딩하여 해(solution) 공간을 탐색한다. 즉, 시스템 변수 사이의 Coupling에 거의 무관하게 해(solution) 공간 탐색이 이루어진다.
2. GA에의 해의 탐색은 solution-by-solution 탐색(point search)이 아니라 해집단(population)내에서의 여러 해에 대한 동시 탐색(concurrent search on hiperplane)이다. 이는 단순한 탐색 횟수의 증가(exploration) 뿐만 아니라 현 탐색 단계까지 누적된 정보의 이용(exploration) 가능성을 효과적으로 높이는 것을 의미한다.

3. GA는 변화율과 같은 시스템에 대한 추가적인 정보를 필요로 하지 않는다.
4. GA는 결정론적인 탐색법(deterministic search)이 아닌 확률론적인 탐색(probabilistic search) 법을 사용한다.
5. GA의 탐색은 항상 목적 함수가 개선되는 방향으로 만의 탐색을 수행하는 것이 아니라 목적 함수가 악화되는 탐색도 확률적으로 허용하기 때문에 국지해(local optima)에 빠지지 않고, 전역 최적해(global optima)에 도달할 확률이 높다.

Table. 1 Analogy between Optimization problem and genetic Algorithm

Optimization Problem	Genetics Algorithm
Cost	Fitness
solution Sub-space	Population
Feasible Solution	Individuals
Variables	String



2. 유전 알고리즘의 작동원리

Holland의 유전 알고리즘은 보통 SGA(Simple Genetic Algorithm)이라고 불리는 것으로, 2진수 문자열을 집단으로 가지고 작업하게 된다. 유전 알고리즘은 우선 연산자 -교배(Crossover) 와 변종(Mutation) -를 이용하여 현재 세대의 집단에서 다음 세대의 집단을 만들어 내게 된다. 이러한 세대 교체는 원하는 조건을 만족시킬 때까지 계속해서 이루어지게 된다. 다음 그림은 유전 알고리즘의 전체적인 흐름을 보인 것이다.

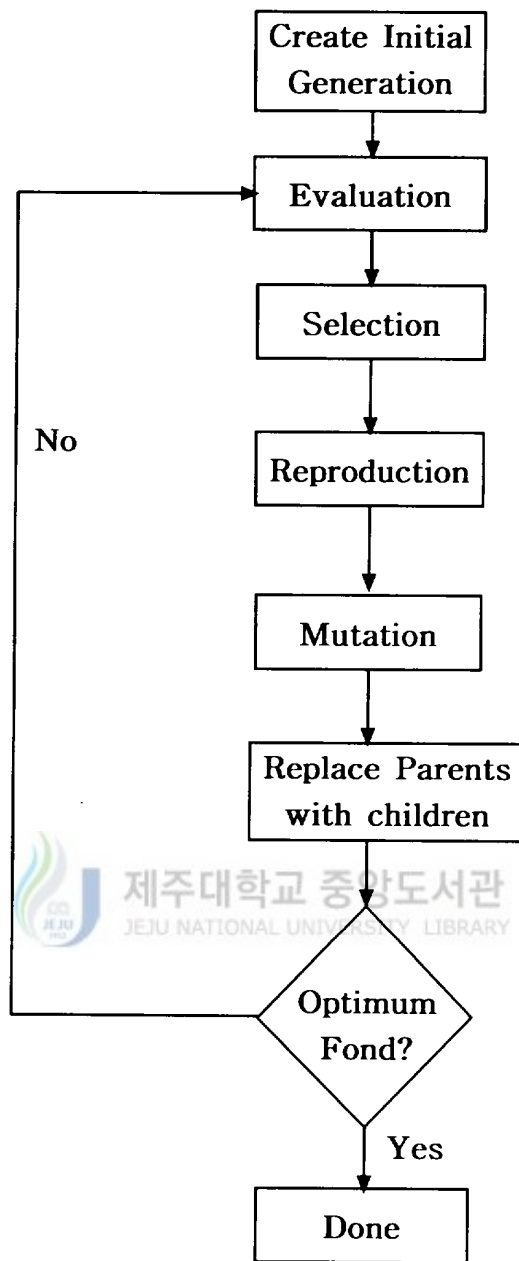


Fig. 2. Flowchart of Genetic Algorithm

2.1 초기 세대 생성

GA에서 한 세대는 유전자들의 집합으로 구성되어 있다. 그렇기 때문에 유전 알고리즘을 시작하기 위해서는 하나의 세대를 구성하여야 한다. Fig. 3은 어떤 변수를 가지고 하나의 유전자를 구성하는 방법을 보여주고 있다.

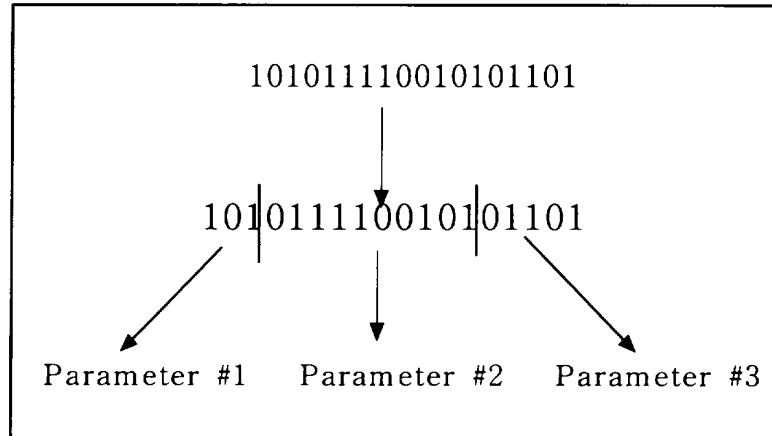


Fig. 3. The chromosome decoding process

이러한 방식으로 변수를 코드화시킨 유전자들을 무작위하게 여러 개 만들어서 초기 세대를 만들게 된다. Fig. 4는 GA의 한 세대 모습을 보여주고 있다.

아래에서는 7개의 유전자가 하나의 세대를 구성하고 있지만, 더 많은 유전자를 사용하여 하나의 세대를 구성할 수 있다. 세대의 구성원이 많아질수록 정확도는 높아지겠지만 최적화에 걸리는 시간은 길어지게 된다. 따라서 적당한 수의 유전자를 가지고 세대수를 구성하는 것이 중요하다.

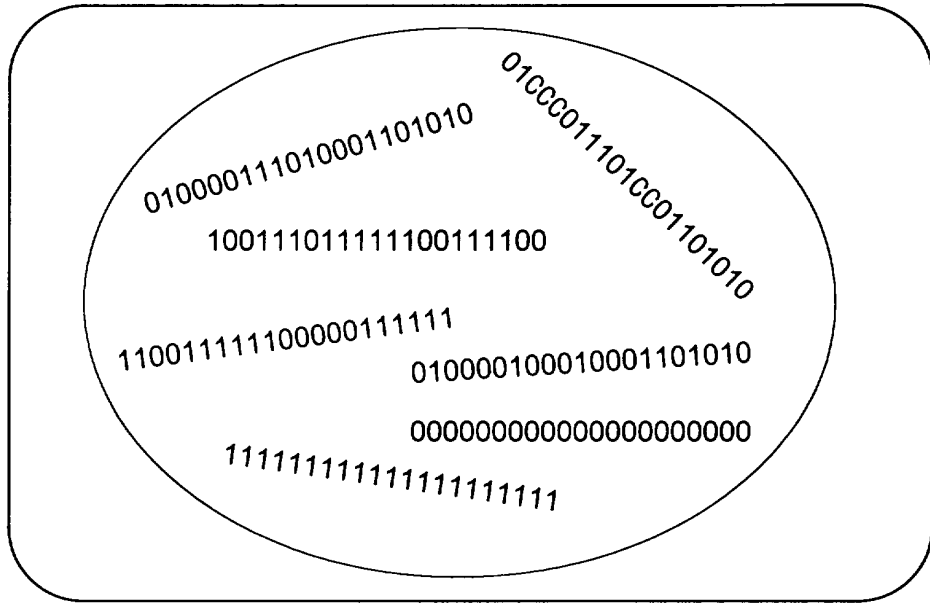


Fig. 4. A typical population in genetic algorithm

2.2 평가(Evaluation)

첫번째 세대가 만들어진 후에는 여러 가지 과정을 거친 다음 새로운 세대를 만들어야 한다. 이때 만들어진 새로운 세대는 앞 세대보다 환경에 좀 더 적응하는(최적 조건에 가까이 가는) 유전자를 갖는다.

유전 알고리즘에서 새로운 세대를 만들기 위해서 평가(Evaluation), 선택(Selection), 도태(Reproduction), 교배(Crossover), 변종(Mutation)의 방법을 사용하게 된다. Fig. 5는 한 세대에서 새로운 세대를 만들어내는 방법을 보인다. 각각의 방법에 대한 설명은 다음과 같다.

우선 평가(Evaluation) 단계는 현 세대의 유전자가 환경에 대해 갖는 적응 정도를 조사하는 부분이다. 유전 알고리즘에서는 환경에 대한 적응 정도를 적응도 혹은 적합성이라는 값으로 가늠하게 된다. 적합성이 나쁜 유전인자는 다음

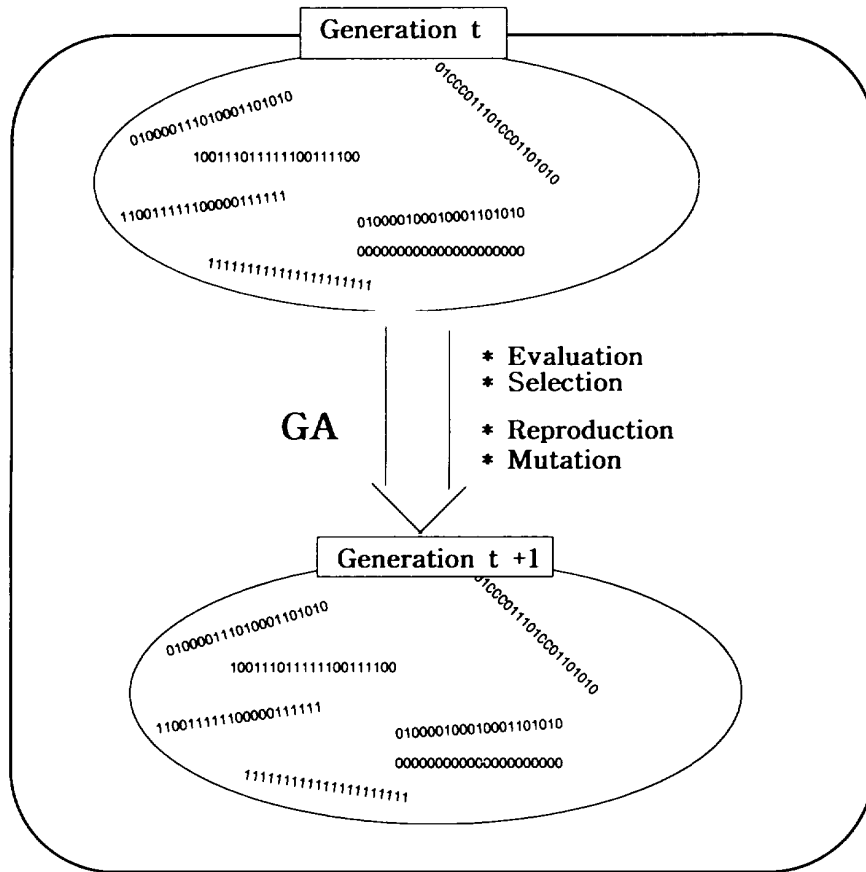


Fig. 5. Production of the next generation in genetic algorithm

세대로 유전되어서는 안되는 것이다. 적합성을 조사하는 방법은 GA를 어떤 문제에 적용하는가에 따라 달라지게 된다.

2.3 도태(Reproduction)

위의 선택과정을 통해 좋은 개체들은 유전되고, 나쁜 개체들은 사라졌지만 더 좋은 방향으로 진일보하지는 못한다. 따라서 개체들의 적합성 향상을 위해 생명체의 유전인자 교환과 같은 교배 과정을 거치게 된다.

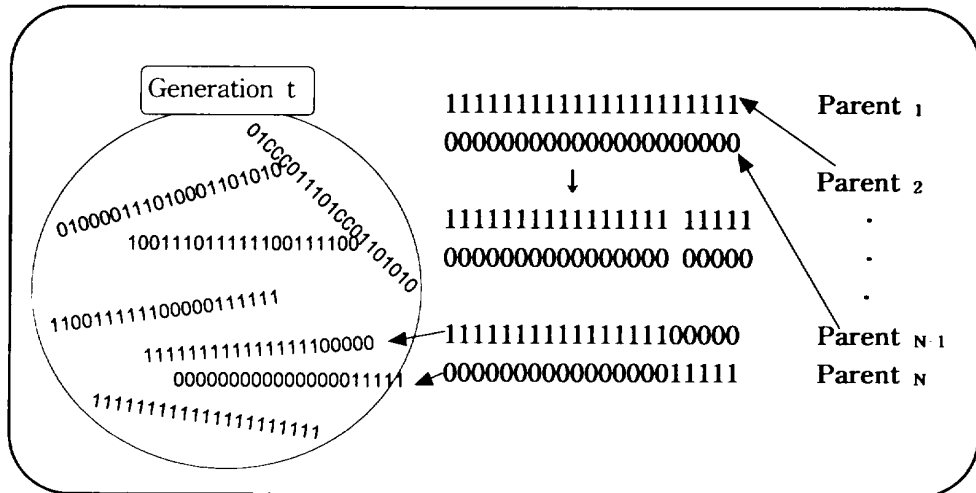


Fig. 6. Crossover

교배는 두 개의 개체를 택하여 각각 임의의 위치에서 "head" 부분과 "tail" 부분으로 나누어 두 개의 문자열을 만든다(Fig. 6). 그리고 두 개체의 tail 부분을 바꾸어 새로운 문자열(유전자)을 만든다. 두 자식 세대의 유전자는 조상으로부터 상속받게 되는 것이다.

위와 같이 적합성이 좋은 개체들을 교배하여 좋은 형질이 다음 세대에 전달되게 함으로써, 다음 세대에도 적합성이 좋은 개체가 나타날 가능성을 높게 된다. 교배는 모든 유전자에 대하여 항상 일어나는 것이 아니라 교배율이라는 것에 의해 지배된다. 교배율을 가지고 Random 함수("1"과 "0"만 나오는 함수)를 실행시켜 "1"이 나오는 경우에는 교배를 수행하고 "0"이 나오는 경우에는 교배를 수행하지 않고 유전자를 그대로 상속하게 된다.

2.4 변종 (Mutation)

교배에 의해 개들이 너무 일찍 일정 형질로 수렴(premature effect)하는

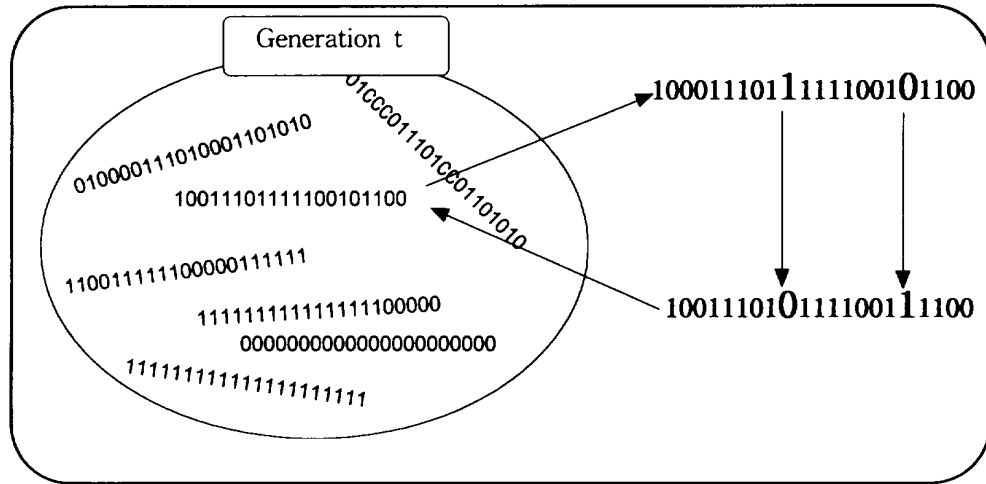


Fig. 7. Mutation

문제점을 보완하기 위해 아주 작은 확률(약 0.001)로 임의의 유전자를 무작위로 변형시켜 준다. 즉 2진수 문자열일 경우 “0”은 “1”로, “1”은 “0”으로 바꾸는 것이다. 만일 1010010010의 문자열의 변종이 일어날 위치가 5라면 1010110010으로 바뀌게 된다(Fig. 7).

변종의 역할은 유전자 배열을 무작위로 바꿈으로써 다른 최적화 알고리즘이 흔히 빠지기 쉬운 국지해(Local Minima)로부터 벗어나게 하는 것이다.

3. 다른 최적화 알고리즘과의 비교

현재 여러 가지 최적화문제를 해결하기 위하여 많은 알고리즘이 소개되고 사용되고 있다. 여기서는 몇가지 최적화 알고리즘들을 소개하고 유전 알고리즘과의 차이점을 비교하고자 한다.

3.1 임의 탐색법(Random Search)

임의 탐색법은 탐색영역을 가장 무작위하게 탐색하는 방법이다. 즉, 탐색 영역의 점들 중에서 임의의 탐색점을 선택한 후에 그곳에 대한 목적 함수값을 계산하게 되는 것이다. 그러나 임의 탐색법은 한정된 개수의 탐색점으로 인해 항상 전역 최적해(global optimum)을 찾아낸다는 보장이 없다는 문제를 가지고 있고, 또한 시간이 너무 오래 걸리는 문제점이 있다(박홍준, 1992).

3.2 구배 탐색법(Gradient Method)

구배 탐색법은 목적함수의 미분값 정보를 이용하여 목적함수가 작아지거나 커지는 방향으로 탐색영역을 조사하는 방법이다. 이 경우에는 목적함수가 항상 연속하고 미분 가능해야 하기 때문에 미분불가 영역에 대한 탐색은 불가능하다.

구배 탐색법은 힐-클라이밍(Hill-Climbing)이라고도 불리는 것으로 하나의 최대 목적 함수값 또는 최소 목적 함수값을 가지고 있는 경우에는 제대로 작동한다. 그러나 여러 개의 최대값이나 최소값이 존재하는 경우는 전역 최적해를 찾지 못하고 국지해에 머무는 경우가 발생하게 된다. 이런 경우에는 최적화가 더 이상 진전하지 못하고 국지해에 빠지게 된다.

3.3 반복탐색법(Iterated Search)

반복탐색법은 임의 탐색법과 구배 탐색법을 혼합한 것으로 전역 최적해를 찾을 때까지 힐-클라이밍을 반복하는 방법이다. 하나의 국지해를 찾은 후 임의로 선정된 새로운 곳에서 또다시 힐-클라이밍을 시도하여 또하나의 최적값을 찾게 된다. 이 방법은 매우 단순하면서 여러 개의 최적값을 갖는 경우에

잘 작동하게 된다. 그러나 각각의 임의 탐색법이 서로 분리되어 있기 때문에 탐색 영역을 전체적으로 볼 수 없다는 문제가 있어 효과적이지 못하다는 단점을 가지고 있다(김석주, 1995).

3.4 시뮬레이티드 아닐링(Simulated Annealing)

시뮬레이티드 아닐링은 1982년 Kirkpatrick에 의해 개발된 방법으로 힐-클라이밍을 수정한 최적화 탐색법이다.

탐색의 방향이 목적함수가 높은 곳으로 이루어진 경우에는 받아들이고(목적함수가 최대가 되는 것이 최적값인 경우), 만약 낮은 곳으로 이루어진 경우라면 $p(t)$ 의 확률을 가지고 받아들이게 된다(t 는 온도). 즉, 국소 최적값을 확률적으로 벗어나는 장치를 제공하는 것이다. $p(t)$ 는 처음엔 “1”에 가까운 값이었지만 점점 줄어들어 나중에 “0”에 가까운 값이 된다. 이는 마치 고체가 열을 받은 후 냉각되는 과정과 비슷하다.

그러므로 처음 탐색을 시작했을 때는 어떠한 방향으로의 이동도 허용되지만, 온도가 떨어짐에 따라 아무 방향으로나 탐색이 이루어질 수 없게 된다. 이러한 방식을 사용하게 되면 국지해를 벗어나면서 비교적 빠른 방법으로 전역 최적해를 찾아낼 수 있게 된다.

그러나, 시뮬레이티드 아닐링은 탐색시 한번에 하나의 후보만을 탐색하기 때문에 탐색 영역을 전체적으로 보지 못하게 된다.

III. 최적의 장전모형 탐색 및 분석

1. 장전모형 및 노심 해석코드

장전모형의 선정은 매우 다양하며 목적에 따라 여러 형태를 선택하게 되나 경제성과 안정성을 고려하여 가장 널리 쓰이고 있는 장전모형은 아래의 두가지이다.

Out-in / Scatter loading patterns :

이전까지 주로 사용한 방법으로 radial power distribution을 편평하게 할 목적으로 새 핵연료 집합체를 노심 바깥에 장전하고 한번 또는 두번 연소된 핵연료 집합체는 노심 안쪽 부분에서 바둑판 형태로 장전한다.

Low-leakage loading patterns(저누출 장전모형) :

주기를 보다 길게 하고, 압력용기의 조사 취하가 유발하는 손상을 감소시키기 위해 첨두출력 한계를 만족하는 한도내에서 새 핵연료 집합체를 노심 안쪽 부분에 장전한다.

상기 모형중 저누출 장전모형에 근거하여 MIT에서 개발되고 현재 경희대학교에서 수정·보완하여 사용중인 SCOUPE라는 노심 해석 코드 중 일부를 수정하여, 본 연구에서 GA를 이용한 최적화 단계에서 필요로 하는 목적함수 계산 모듈로 사용하였다. 참고로, 저누출 장전모형에서는 노심 내부에서 첨두출력의 과도한 상승을 방지하기 위해 독물질(burnable poison)의 적절한 적용이 요구되나, SCOUPE 코드에서는 이를 고려하지 않고 있다.

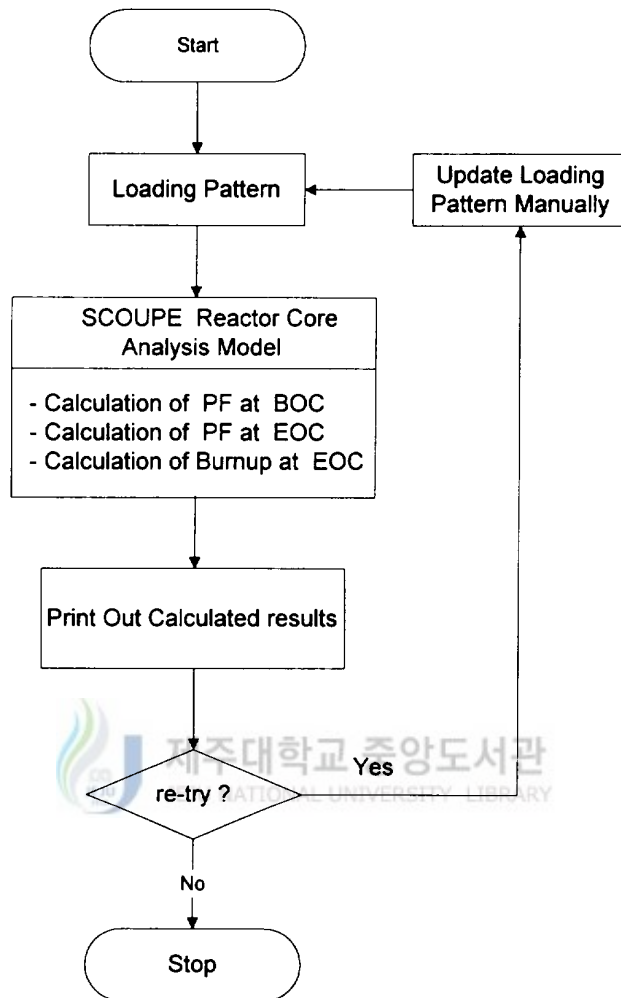


Fig. 8. Schematic flowchart of the SCOUBE

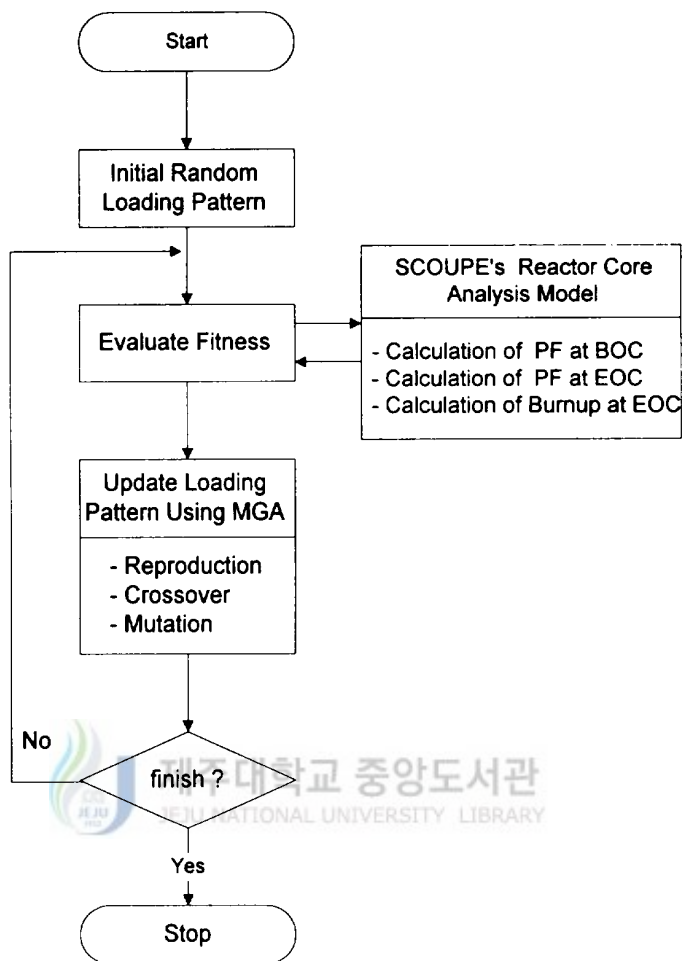


Fig. 9. Schematic flowchart of the MGA_SCOUPE

Fig. 8은 현재 SCOUPE의 개략적인 작업 흐름도이고, Fig. 9는 본 연구에서 GA를 이용하여 SCOUPE를 개선한 MGA_SCOUPE의 개략적인 작업 흐름도이다. Fig. 8에서 볼 수 있듯이 SCOUPE에서의 장전패턴 탐색은 사용자의 경험 및 직관에 크게 의존하는 반복적 경험 및 직관에 크게 의존하는 반복적 수동 탐색이다. 이에 반하여 Fig. 9의 MGA_SCOUPE에서는 GA가 갖는 전역 최적해 탐색 능력을 이용함으로써 SCOUPE에 보이는 탐색결과에 대한 의존성을 가능한 배제토록 하였다. 또한, 수많은 장전 패턴의 생성 및 평가 작업이 GA를 통하여 일관되게 자동처리 되도록 하여, 최종결과에 도달하기 위해 투여될 수작업과 시간을 획기적으로 단축시켰다.



2. GA를 이용한 최적의 장전모형 탐색 및 목적함수

앞에서도 언급된 바와 같이 본 연구에서는 고리 4호기 4주기에 대해서 주어진 구속 조건하에서 노심 출력 분포의 균질화와 더불어 노심평균 출력분포를 최대화시킬 수 있는 최적의 장전모형을 찾는 것을 연구 목표로 하였다.

이를 위해 GA에서의 최적해 탐색에 사용되는 적응도는 다음과 같이 정의하여 사용하였다.

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

where,

X : arbitrary loading pattern(candidate solution)

W_i : weighting factor

r_i : MGA_SCOUPE relative improvement with respect to SCOUPE

여기서, 실제 사용된 W_i 및 r_i 는 다음과 같이 계산된다.

$$W_1 = W_2 = 1.0$$

$$W_3 = 0.1$$

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

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

$$r_3^{(X)} = \frac{X \text{에 대한 } EOC \text{ 연소도 출력}}{X^s \text{에 대한 } EOC \text{ 연소도 출력}}$$

$\sigma_{BOC}(X)$: 임의의 장전 패턴 X 에 따른 BOC에서의 출력분포 표준편차

$\sigma_{EOC}(X)$: 임의의 장전 패턴 X 에 따른 EOC에서의 출력분포 표준편차

X^s : SCOUPE를 이용하여 구해진 최적 장전 패턴

3. 장전모형 탐색 결과 및 분석

본 연구의 최적의 장전 모형 탐색 방법(MGA_SCOUPE)을 고리 4호기-4주기 모델에 적용하여 얻은 결과를 ROCS의 계산 결과 및 MIT에서 개발되어 경희대학교에서 수정·보완하여 사용 중인 SCOUPE의 결과와 비교하였다. 상기 모델의 원자로에서는 157개의 핵연료 집합체가 사용되며, 각 집합체는 17×17 배열의 264 핵연료봉과 24개의 안내관(Guide Thimble)과 1개의 계측관으로 구성되어 있다. 이 원자로로는 Westinghouse사에서 설계한 2775MWt급의 저누출 장전 노심이며, 4주기에서는 개량된 핵연료 집합체인 OFA(Optimized Fuel Assembly)를 사용하고 있다.

Fig. 10은 SCOUPE 결과, MGA_SCOUPE 결과에 따른 집합체 배치도를 SCOUPE ID, MGA ID로 구분하여 함께 나타낸 것이다.

Fig. 11, Fig. 12는 첨두출력밀도를 요약한 것이며, Fig. 13, ~ 18은 각 핵연료 집합체의 주기초, 주기말의 출력 분포와 주기말에서의 연소도 분포의 차이를 보여주고 있다. 주기초, 주기말에서의 출력 분포에 대한 결과를 SCOUPE와 비교해 보면, 내부 핵연료 집합체(interior assembly)에서는 많은

집합체에서 오차를 보이고 있으나, 전체적으로 보았을 때 침투출력인자를 넘지 않으므로 대체로 만족할 만한 결과를 보여주고 있다. 주기말에서의 출력 분포와 연소도를 살펴보면, 출력 분포는 내부 핵연료 집합체(interior assembly)와 반사체 인접 핵연료 집합체(peripheral assembly)에서는 대체로 SCOUPE보다 좋은 결과를 보이고 있다. 연소도 분포는 MGA_SCOUPE가 거의 모든 핵연료 집합체에서 SCOUPE의 결과보다 연소도 값의 증가된 결과를 보이고 있다.

연소도는 핵연료에 포함되어 있는 중원소(heavy element)가 핵분열 반응에 의해서 그 단위 질량당 생성하는 열량의 척도가 된다. UO_2 를 핵연료로 하는 가압경수로의 경우 연소도는 우라늄 연료가 노심에 장전된 이후 노심에 머무는 동안 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 각 방법에 따른 노심 평균연소도로서 SCOUPE가 10074.7 MWD/MTU, ROCS가 10500 MWD/MTU 보이는데 반해 MGA_SCOUPE로 계산된 값은 14956 MWD/MTU로서 SCOUPE 및 ROCS의 결과 보다 약 45% 이상 증가될 수 있음을 보였다.

Table 2. Comparison of Reactor core average burnup distribution

	by SCOUPE	by ROCS	by MGA_SCOUPE
노심평균연소도 (MWD/MTU)	10,075	10,500	14,956

C.L.
|

		1	2	3	4	5	6	7	8
— 1	1	10 8 1	9 6 2	5 8 1	4 3 F	7 5 1	5 7 1	5 5 1	9 2 2
	2	9 6 2	8 10 1	8 4 1	12 9 2	8 12 1	5 9 1	2 2 F	9 1 2
	3	5 8 1	8 4 1	7 9 1	3 11 F	12 3 2	3 5 F	1 1 F	
	4	4 3 F	12 9 2	3 11 F	11 3 2	6 5 1	1 1 F	10 2 2	
	5	7 5 1	8 12 1	12 3 2	6 5 1	1 2 F	11 6 2		
	6	5 7 1	5 9 1	3 5 2	1 1 F	11 6 2			
	7	5 5 1	2 2 F	1 1 F	9 2 2				
	8	9 2 2	9 1 2						

SCOUPE ID MGA ID
F/A BATCH

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Fig. 10. Fuel Composition Loading Map of Kori-4, Cycle-4

Table. 3은 SCOUPE, ROCS 및 MGA_SCOUPE의 주기초, 주기말에서의 침 두출력밀도 PF의 표준편차를 나타낸 것이다. 주기초에서 표준편차에 대한 비교를 보면, 최대값과 최소값의 차이도 작을 뿐 아니라 표준편차는 MGA_SCOUPE가 SCOUPE 및 ROCS보다 상당히 작은 값으로 보다 평활화 되었음을 보인다. 주기말에서도 MGA_SCOUPE가 SCOUPE 및 ROCS의 최대값과 최소값의 차이보다 작음을 알 수 있다.

Table. 3 Comparison of Power Peaking factor distribution

	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
del PF (max PF-minPF)	0.9867	0.9599	0.9710	0.9400	0.8020	0.8446

PF : Power Peaking factor(침 두출력인자)

Table. 4는 MGA_SCOUPE 와 SCOUPE에서의 각 핵연료집합체별 집합체 수와 평균출력을 비교하여 나타낸 것이다. Table. 5는 각 핵연료집합체별 연소도 분포를 나타낸 것이다.

Table. 4 Comparison of Average Power of each Assembly Type
: MGA_SCOUPE vs. SCOUPE

MGA_SCOUPE			SCOUPE		
TYPE	NUMBER of ASSEMBLY	AVG. POWER	TYPE	NUMBER of ASSEMBLY	AVG. POWER
1	24	1.004754E+00	1	20	1.105960E+00
2	24	9.689623E-01	2	8	1.278960E+00
3	16	1.234319E+00	3	16	1.219271E+00
4	8	9.915609E-01	4	4	1.162083E+00
5	24	1.188020E+00	5	20	1.257092E+00
6	12	7.242211E-01	6	8	1.068962E+00
7	4	1.025518E+00	7	8	1.208354E+00
8	5	1.006349E+00	8	20	1.136728E+00
9	20	9.313132E-01	9	20	5.285718E-01
10	4	8.114337E-01	10	12	6.054202E-01
11	8	9.462889E-01	11	5	5.253669E-01
12	8	7.712433E-01	12	16	8.708892E-01
Total	157	9.999999E-01	Total	157	1.000000E+00

Table. 5 Comparison of Brunup by Assembly Type & Current Rho
: MGA_SCOUPE vs. SCOUPE

MGA_SCOUPE			SCOUPE		
TYPE	BURNUP (MWD/MTU)	RHO	TYPE	BURNUP (MWD/MTU)	RHO
1	13898.6	0.13004	1	11030.6	0.13477
2	13574.8	0.11277	2	12351.3	0.11411
3	18955.0	0.07653	3	12614.5	0.07659
4	17001.5	0.04826	4	12031.6	0.04831
5	16779.1	0.00239	5	12170.3	0.01253
6	11162.2	0.01957	6	10969.8	0.01976
7	14813.6	0.00984	7	12281.5	0.01288
8	17114.3	0.00699	8	11554.5	0.01311
9	14378.6	-0.03053	9	5253.3	-0.1867
10	14217.0	-0.06085	10	6283.0	-0.06006
11	14844.0	-0.05491	11	5323.3	-0.05005
12	11852.7	-0.12007	12	9047.8	-0.12004

***** SUMMARY OF POWER PEAKING FACTORS *****							
RANK	LOCATION	F	# IN CORE	TYPE	CORE RHO	BP RHO	SP RHO
	(I, J)						
1	(4 6)	1.3914	4	1	0.1530	0.0000	0.0174
2	(6 4)	1.3914	4	1	0.1530	0.0000	0.0174
3	(4 5)	1.3524	4	5	0.0393	0.0000	0.0174
4	(5 4)	1.3524	4	5	0.0393	0.0000	0.0174
5	(4 4)	1.3399	4	3	0.0767	0.0000	0.0174
6	(5 5)	1.3132	4	2	0.1277	0.0000	0.0174
7	(3 5)	1.2471	4	3	0.0767	0.0000	0.0174
8	(5 3)	1.2471	4	3	0.0767	0.0000	0.0174
9	(7 2)	1.2029	4	2	0.1277	0.0000	0.0174
10	(2 7)	1.2029	4	2	0.1277	0.0000	0.0174
11	(3 6)	1.1926	4	5	0.0393	0.0000	0.0174
12	(6 3)	1.1926	4	5	0.0393	0.0000	0.0174
13	(1 4)	1.1032	2	3	0.0767	0.0000	0.0174
14	(4 1)	1.1032	2	3	0.0767	0.0000	0.0174
15	(7 1)	1.0576	2	5	0.0393	0.0000	0.0174
16	(1 7)	1.0576	2	5	0.0393	0.0000	0.0174
17	(7 3)	1.0335	4	1	0.1530	0.0000	0.0174
18	(3 7)	1.0335	4	1	0.1530	0.0000	0.0174
19	(6 1)	1.0255	2	7	0.0276	0.0000	0.0174
20	(1 6)	1.0255	2	7	0.0276	0.0000	0.0174
21	(3 1)	1.0182	2	8	0.0258	0.0000	0.0174
22	(1 3)	1.0182	2	8	0.0258	0.0000	0.0174
23	(3 2)	0.9916	4	4	0.0484	0.0000	0.0174
24	(2 3)	0.9916	4	4	0.0484	0.0000	0.0174
25	(5 1)	0.9804	2	5	0.0393	0.0000	0.0174
26	(1 5)	0.9804	2	5	0.0393	0.0000	0.0174
27	(2 6)	0.9757	4	9	-.0118	0.0000	0.0174
28	(6 2)	0.9757	4	9	-.0118	0.0000	0.0174
29	(1 1)	0.9590	1	8	0.0258	0.0000	0.0174
30	(3 4)	0.9463	4	11	-.0473	0.0000	0.0174
31	(4 3)	0.9463	4	11	-.0473	0.0000	0.0174
32	(2 1)	0.9403	2	6	0.0307	0.0000	0.0174
33	(1 2)	0.9403	2	6	0.0307	0.0000	0.0174
34	(3 3)	0.9115	4	9	-.0118	0.0000	0.0174
35	(4 2)	0.8968	4	9	-.0118	0.0000	0.0174
36	(2 4)	0.8968	4	9	-.0118	0.0000	0.0174
37	(2 2)	0.8114	4	10	-.0594	0.0000	0.0174
38	(2 5)	0.7712	4	12	-.1199	0.0000	0.0174
39	(5 2)	0.7712	4	12	-.1199	0.0000	0.0174
40	(7 4)	0.7007	4	2	0.1277	0.0000	0.0174
41	(4 7)	0.7007	4	2	0.1277	0.0000	0.0174
42	(8 1)	0.6935	2	2	0.1277	0.0000	0.0174
43	(1 8)	0.6935	2	2	0.1277	0.0000	0.0174
44	(6 5)	0.6162	4	6	0.0307	0.0000	0.0174
45	(5 6)	0.6162	4	6	0.0307	0.0000	0.0174
46	(8 2)	0.5894	4	1	0.1530	0.0000	0.0174
47	(2 8)	0.5894	4	1	0.1530	0.0000	0.0174

Fig. 11. Calculation Result of power peaking factor : MGA_SCOUPE

***** SUMMARY OF POWER PEAKING FACTORS *****							
RANK	LOCATION	F	#	IN CORE	TYPE	CORE BP	SP
	(I, J)					RHO RHO	RHO
1	(3 4)	1.2906	4		3	0.0766	0.0000
2	(4 3)	1.2884	4		3	0.0766	0.0000
3	(3 6)	1.2868	4		3	0.0766	0.0000
4	(6 3)	1.2739	4		3	0.0766	0.0000
5	(3 3)	1.2627	4		7	0.0128	0.0000
6	(1 4)	1.2279	2		4	0.0483	0.0000
7	(4 1)	1.2249	2		4	0.0483	0.0000
8	(2 6)	1.2076	4		5	0.0112	0.0000
9	(1 3)	1.2075	2		5	0.0125	0.0000
10	(3 1)	1.2064	2		5	0.0126	0.0000
11	(6 2)	1.1993	4		5	0.0116	0.0000
12	(1 5)	1.1991	2		7	0.0129	0.0000
13	(5 1)	1.1944	2		7	0.0130	0.0000
14	(2 3)	1.1891	4		8	0.0129	0.0000
15	(3 2)	1.1883	4		8	0.0129	0.0000
16	(1 6)	1.1878	2		5	0.0113	0.0000
17	(4 6)	1.1836	4		1	0.1331	0.0000
18	(6 1)	1.1811	2		5	0.0116	0.0000
19	(2 7)	1.1792	4		2	0.1140	0.0000
20	(2 2)	1.1731	4		8	0.0130	0.0000
21	(6 4)	1.1679	4		1	0.1335	0.0000
22	(7 2)	1.1668	4		2	0.1142	0.0000
23	(5 5)	1.1315	4		1	0.1342	0.0000
24	(2 5)	1.1199	4		8	0.0133	0.0000
25	(5 2)	1.1148	4		8	0.0135	0.0000
26	(4 5)	1.1114	4		6	0.0197	0.0000
27	(5 4)	1.1061	4		6	0.0198	0.0000
28	(1 2)	1.0726	2		9	-0.0258	0.0000
29	(2 1)	1.0723	2		9	-0.0258	0.0000
30	(4 4)	1.0336	4		10	-0.0604	0.0000
31	(1 7)	1.0003	2		5	0.0156	0.0000
32	(7 1)	0.9922	2		5	0.0160	0.0000
33	(3 7)	0.9762	4		1	0.1363	0.0000
34	(1 1)	0.9697	1		11	-0.0522	0.0000
35	(7 3)	0.9598	4		1	0.1367	0.0000
36	(2 4)	0.9305	4		12	-0.1200	0.0000
37	(4 2)	0.9283	4		12	-0.1200	0.0000
38	(3 5)	0.9235	4		12	-0.1200	0.0000
39	(5 3)	0.9186	4		12	-0.1200	0.0000
40	(4 7)	0.4522	4		9	-0.0178	0.0000
41	(5 6)	0.4475	4		10	-0.0599	0.0000
42	(6 5)	0.4446	4		10	-0.0599	0.0000
43	(7 4)	0.4218	4		11	-0.0495	0.0000
44	(1 8)	0.3838	2		9	-0.0171	0.0000
45	(8 1)	0.3804	2		9	-0.0170	0.0000
46	(2 8)	0.3340	4		9	-0.0164	0.0000
47	(8 2)	0.3307	4		9	-0.0163	0.0000

Fig. 12. Calculation Result of power peaking factor : SCOUBE

*** COMPARISON MGA WITH REFERENCE AT BOC (RLF = 0.1430)**

FUEL TYPE
REFERENCE
MGA

$$\% \text{ ERROR} = 100 * (\text{MGA} - \text{REFERENCE}) / \text{REFERENCE}$$

1 1 8	2 1 6	3 1 8	4 1 3	5 1 5	6 1 7	7 1 5	8 1 2
0.9950	1.0950	1.1740	1.1480	1.2280	1.3160	1.0790	0.3950
0.9590	0.9403	1.0182	1.1032	0.9804	1.0255	1.0576	0.6935
-3.617	-14.131	-13.272	-3.899	-20.163	-22.073	-1.980	75.565
1 2 6	2 2 10	3 2 4	4 2 9	5 2 12	6 2 9	7 2 2	8 2 1
1.0950	1.1500	1.1450	0.9070	1.1530	1.3120	1.2080	0.3450
0.9403	0.8114	0.9916	0.8968	0.7712	0.9757	1.2029	0.5894
-14.131	-29.441	-13.401	-1.123	-33.110	-25.631	-0.422	70.840
1 3 8	2 3 4	3 3 9	4 3 11	5 3 3	6 3 5	7 3 1	8 3 0
1.1740	1.1390	1.1500	1.1370	0.9923	1.2740	1.0220	0.0000
1.0182	0.9916	0.9115	0.9463	1.2471	1.1926	1.0335	0.0000
-13.272	-12.945	-20.741	-16.773	25.676	-6.386	1.125	0.000
1 4 3	2 4 9	3 4 11	4 4 3	5 4 5	6 4 1	7 4 2	8 4 0
1.1480	0.9060	1.1350	0.9080	1.1050	1.1600	0.4300	0.0000
1.1032	0.8968	0.9463	1.3399	1.3524	1.3914	0.7007	0.0000
-3.899	-1.014	-16.627	47.562	22.389	19.946	62.944	0.000
1 5 5	2 5 12	3 5 3	4 5 5	5 5 2	6 5 6	7 5 0	8 5 0
1.2280	1.1510	0.9200	1.1010	1.1410	0.4990	0.0000	0.0000
0.9804	0.7712	1.2471	1.3524	1.3132	0.6162	0.0000	0.0000
-20.163	-32.994	35.553	22.834	15.089	23.487	0.000	0.000
1 6 7	2 6 9	3 6 5	4 6 1	5 6 6	6 6 0	7 6 0	8 6 0
1.3160	1.3040	1.2720	1.1620	0.5000	0.0000	0.0000	0.0000
1.0255	0.9757	1.1926	1.3914	0.6162	0.0000	0.0000	0.0000
-22.073	-25.174	-6.239	19.739	23.240	0.000	0.000	0.000
1 7 5	2 7 2	3 7 1	4 7 2	5 7 0	6 7 0	7 7 0	8 7 0
1.0790	1.2020	1.0220	0.4450	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
1.0576	1.2029	1.0335	0.7007	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
-1.980	0.075	1.125	57.451	0.000	0.000	0.000	0.000
1 8 2	2 8 1	3 8 0	4 8 0	5 8 0	6 8 0	7 8 0	8 8 0
0.3950	0.3440	0.0000	0.000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.6935	0.5894	0.0000	0.000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
75.565	71.336	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

Fig. 13. Calculation Result of Assembly Power Distribution at BOC of Kori-4, Cycle-4 : MGA_SCOUPE

**** COMPARISON SCOUBE WITH REFERENCE AT BOC(RLF = 0.1430) ****

FUEL TYPE
REFERENCE
SCOUBE

$$\% \text{ ERROR} = 100 * (\text{SCOUBE} - \text{REFERENCE}) / \text{REFERENCE}$$

1 1 11	2 1 9	3 1 5	4 1 4	5 1 7	6 1 5	7 1 5	8 1 9
0.9950	1.0950	1.1740	1.1480	1.2280	1.3160	1.0790	0.3950
0.9369	1.0521	1.2040	1.1573	1.2190	1.3141	1.1118	0.4111
-5.841	-3.916	2.551	0.810	-0.733	-0.144	3.043	4.073
1 2 9	2 2 8	3 2 8	4 2 12	5 2 8	6 2 5	7 2 2	8 2 9
1.0950	1.1500	1.1450	0.9070	1.1530	1.3120	1.2080	0.3450
1.0531	1.1419	1.1446	0.8662	1.1169	1.3011	1.2637	0.3526
-3.822	-0.704	-0.035	-4.499	-3.134	-0.831	4.612	2.193
1 3 5	2 3 8	3 3 7	4 3 3	5 3 12	6 3 3	7 3 1	8 3 0
1.1740	1.1390	1.1500	1.1370	0.9923	1.2740	1.0220	0.0000
1.2083	1.1474	1.1891	1.1653	0.8668	1.2565	1.0005	0.0000
2.921	0.742	3.398	2.486	-12.651	-1.371	-2.103	0.000
1 4 4	2 4 12	3 4 3	4 4 10	5 4 6	6 4 1	7 4 11	8 4 0
1.1480	0.9060	1.1350	0.9080	1.1050	1.1600	0.4300	0.0000
1.1669	0.8726	1.1707	0.9445	1.0638	1.1738	0.4225	0.0000
1.644	-3.688	3.145	4.025	-3.726	1.190	-1.747	0.000
1 5 7	2 5 8	3 5 12	4 5 6	5 5 1	6 5 10	7 5 0	8 5 0
1.2280	1.1510	0.9200	1.1010	1.1410	0.4990	0.0000	0.0000
1.2363	1.1328	0.8780	1.0741	1.1208	0.4331	0.0000	0.0000
0.673	-1.580	-4.564	-2.444	-1.766	-13.197	0.000	0.000
1 6 5	2 6 5	3 6 3	4 6 1	5 6 10	6 6 0	7 6 0	8 6 0
1.3160	1.3040	1.2720	1.1620	0.5000	0.0000	0.0000	0.0000
1.3393	1.3272	1.2846	1.2025	0.4386	0.0000	0.0000	0.0000
1.769	1.782	0.989	3.485	-12.287	0.000	0.000	0.000
1 7 5	2 7 2	3 7 1	4 7 9	5 7 0	6 7 0	7 7 0	8 7 0
1.0790	1.2020	1.0220	0.4450	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
1.1368	1.2942	1.0321	0.4609	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
5.356	7.671	0.992	3.566	0.000	0.000	0.000	0.000
1 8 9	2 8 9	3 8 0	4 8 0	5 8 0	6 8 0	7 8 0	8 8 0
0.3950	0.3440	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.4205	0.3610	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
6.466	4.934	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

Fig. 14. Calculation Result of Assembly power distribution at BOC of Kori-4, Cycle-4 : SCOUBE

*** COMPARISON MGA WITH REFERENCE AT EOC(RLF = 0.1430)***

FUEL TYPE							
REFERENCE							
MGA							
$\% \text{ ERROR} = 100 * (\text{MGA} - \text{REFERENCE}) / \text{REFERENCE}$							
1 1 8	2 1 6	3 1 8	4 1 3	5 1 5	6 1 7	7 1 5	8 1 2
0.9600	1.0260	1.1540	1.3180	1.1680	1.1640	1.0000	0.4420
1.2670	1.2451	1.2987	1.3480	1.0134	0.9660	0.9240	0.6291
31.983	21.356	12.538	2.273	-13.234	-17.010	-7.599	42.326
1 2 6	2 2 10	3 2 4	4 2 9	5 2 12	6 2 9	7 2 2	8 2 1
1.0250	1.0890	1.1360	0.9890	1.1320	1.1830	1.1260	0.3790
1.2449	1.0978	1.2920	1.0502	0.8216	0.9070	1.0693	0.5320
21.453	0.812	13.734	6.190	-27.418	-23.333	-5.034	40.364
1 3 8	2 3 4	3 3 9	4 3 11	5 3 3	6 3 5	7 3 1	8 3 0
1.1540	1.1330	1.1810	1.3150	0.9790	1.3050	0.9700	0.0000
1.2978	1.2913	1.0890	1.0477	1.2632	1.0375	0.8895	0.0000
12.463	13.971	-7.789	-20.328	29.030	-20.499	-8.302	0.000
1 4 3	2 4 9	3 4 11	4 4 3	5 4 5	6 4 1	7 4 2	8 4 0
1.3180	0.9890	1.3140	0.9930	1.0910	1.1130	0.4560	0.0000
1.3461	1.0489	1.0467	1.3752	1.1944	1.1660	0.6058	0.0000
2.129	6.055	-20.344	38.488	9.477	4.762	32.843	0.000
1 5 5	2 5 12	3 5 3	4 5 5	5 5 2	6 5 6	7 5 0	8 5 0
1.1680	1.1320	0.9780	1.0890	1.0890	0.5150	0.0000	0.0000
1.0108	0.8194	1.2596	1.1936	1.1521	0.5397	0.0000	0.0000
-13.458	-27.613	28.792	9.601	5.797	4.799	0.000	0.000
1 6 7	2 6 9	3 6 5	4 6 1	5 6 6	6 6 0	7 6 0	8 6 0
1.1640	1.1810	1.3060	1.1180	0.5170	0.0000	0.0000	0.0000
0.9618	0.9032	-1.0337	1.1660	0.5397	0.0000	0.0000	0.0000
-17.375	-23.522	-20.851	4.294	4.393	0.000	0.000	0.000
1 7 5	2 7 2	3 7 1	4 7 2	5 7 0	6 7 0	7 7 0	8 7 0
1.0000	1.1240	0.9730	0.4710	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.9174	1.0630	0.8865	0.6066	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
-8.256	-5.427	-8.889	28.783	0.000	0.000	0.000	0.000
1 8 2	2 8 1	3 8 0	4 8 0	5 8 0	6 8 0	7 8 0	8 8 0
0.4420	0.3780	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.6261	0.5306	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
41.654	40.364	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

Fig. 15. Calculation Result of Assembly Power Distribution at EOC of Kori-4, Cycle-4 : MGA_SCOUPE

****COMPARISON SCOUPE WITH REFERENCE AT EOC(RLF=0.1430)****

FUEL TYPE								
REFERENCE								
SCOUPE								
% ERROR = 100 * (SCOUPE - REFERENCE) / REFERENCE								
1 1 11	2 1 9	3 1 5	4 1 4	5 1 7	6 1 5	7 1 5	8 1 9	
0.9600	1.0260	1.1540	1.3180	1.1680	1.1640	1.0000	0.4420	
0.9697	1.0723	1.2064	1.2249	1.1944	1.1811	0.9922	0.3804	
1.013	4.515	4.540	-7.063	2.256	1.471	-0.778	-13.935	
1 2 9	2 2 8	3 2 8	4 2 12	5 2 8	6 2 5	7 2 2	8 2 9	
1.0250	1.0890	1.1360	0.9890	1.1320	1.1830	1.1260	0.3790	
1.0726	1.1731	1.1883	0.9283	1.1148	1.1993	1.1668	0.3307	
4.641	7.726	4.601	-6.133	-1.516	1.377	3.622	-12.749	
1 3 5	2 3 8	3 3 7	4 3 3	5 3 12	6 3 3	7 3 1	8 3 0	
1.1540	1.1330	1.1810	1.3150	0.9790	1.3050	0.9700	0.0000	
1.2075	1.1891	1.2627	1.2884	0.9186	1.2739	0.9598	0.0000	
4.632	4.949	6.921	-2.025	-6.165	-2.381	-1.048	0.000	
1 4 4	2 4 12	3 4 3	4 4 10	5 4 6	6 4 1	7 4 11	8 4 0	
1.3180	0.9890	1.3140	0.9930	1.0910	1.1130	0.4560	0.0000	
1.2279	0.9305	1.2906	1.0336	1.1061	1.1679	0.4218	0.0000	
-6.839	-5.915	-1.780	4.084	1.381	4.931	-7.497	0.000	
1 5 7	2 5 8	3 5 12	4 5 6	5 5 1	6 5 10	7 5 0	8 5 0	
1.1680	1.1320	0.9780	1.0890	1.0890	0.5150	0.0000	0.0000	
1.1991	1.1199	0.9235	1.1114	1.1315	0.4446	0.0000	0.0000	
2.665	-1.072	-5.568	2.055	3.902	-13.675	0.000	0.000	
1 6 5	2 6 5	3 6 3	4 6 1	5 6 10	6 6 0	7 6 0	8 6 0	
1.1640	1.1810	1.3060	1.1180	0.5170	0.0000	0.0000	0.0000	
1.1878	1.2076	1.2868	1.1836	0.4475	0.0000	0.0000	0.0000	
2.048	2.253	-1.472	5.864	-13.446	0.000	0.000	0.000	
1 7 5	2 7 2	3 7 1	4 7 9	5 7 0	6 7 0	7 7 0	8 7 0	
1.0000	1.1240	0.9730	0.4710	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	
1.0003	1.1792	0.9762	0.4522	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	
0.029	4.909	0.329	-3.987	0.000	0.000	0.000	0.000	
1 8 9	2 8 9	3 8 0	4 8 0	5 8 0	6 8 0	7 8 0	8 8 0	
0.4420	0.3780	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	
0.3838	0.3340	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	
-13.175	-11.636	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	

Fig. 16. Calculation Result of Assembly Power Distribution at EOC of Kori-4, Cycle-4 : SCOUPE

****AVG. CYCLE BURNUP(MWD/MTU) DIFFERENCE WITH REFERENCE ****

FUEL TYPE								
REFERENCE								
MGA								
DIFFERENCE = (MGA - REFERENCE) * 100 / REFERENCE								
1 1 8	2 1 6	3 1 8	4 1 3	5 1 5	6 1 7	7 1 5	8 1 2	
9219.0	10984.0	12386.0	13663.0	12767.0	13168.0	11042.0	4499.0	
16575.8	16273.0	17252.1	18252.3	14846.6	14829.4	14755.9	9848.2	
79.8	48.2	39.3	33.6	16.3	12.6	33.6	118.9	
1 2 6	2 2 10	3 2 4	4 2 9	5 2 12	6 2 9	7 2 2	8 2 1	
10984.0	11878.0	12228.0	9971.0	12277.0	13242.0	12586.0	3890.0	
16271.3	14217.0	17004.2	14498.2	11860.9	14019.1	16919.6	8350.1	
48.1	19.7	39.1	45.4	-3.4	5.9	34.4	114.7	
1 3 8	2 3 4	3 3 9	4 3 11	5 3 3	6 3 5	7 3 1	8 3 0	
12386.0	12228.0	12509.0	13545.0	10028.0	14182.0	10792.0	0.0	
17245.7	16998.8	14896.2	14847.7	18692.3	16606.2	14318.9	0.0	
39.2	39.0	19.1	9.6	86.4	17.1	32.7	0.0	
1 4 3	2 4 9	3 4 11	4 4 3	5 4 5	6 4 1	7 4 2	8 4 0	
13663.0	9971.0	13545.0	10158.0	11776.0	12354.0	4232.0	0.0	
18238.3	14488.2	14840.2	20217.0	18964.1	19042.9	9728.0	0.0	
33.5	45.3	9.6	99.0	61.0	54.1	129.9	0.0	
1 5 5	2 5 12	3 5 3	4 5 5	5 5 2	6 5 6	7 5 0	8 5 0	
12767.0	12277.0	10028.0	11776.0	12099.0	5395.0	0.0	0.0	
14827.1	11844.5	18665.4	18957.9	18357.3	8607.2	0.0	0.0	
16.1	-3.5	86.1	61.0	51.7	59.5	0.0	0.0	
1 6 7	2 6 9	3 6 5	4 6 1	5 6 6	6 6 0	7 6 0	8 6 0	
13168.0	13242.0	14182.0	12354.0	5395.0	0.0	0.0	0.0	
14797.8	13991.0	16577.9	19042.9	8607.3	0.0	0.0	0.0	
12.4	5.7	16.9	54.1	59.5	0.0	0.0	0.0	
1 7 5	2 7 2	3 7 1	4 7 2	5 7 0	6 7 0	7 7 0	8 7 0	
11042.0	12586.0	10792.0	4916.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
14706.9	16872.6	14296.9	9734.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
33.2	34.1	32.5	98.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
1 8 2	2 8 1	3 8 0	4 8 0	5 8 0	6 8 0	7 8 0	8 8 0	
4499.0	3890.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
9826.1	8339.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
118.4	114.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	

Fig. 17. Calculation Result of Assembly Burnup Distribution at EOC of KORI-4, Cycle-4 : MGA_SCOUPE

****AVG. CYCLE BURNUP(MWD/MTU) DIFFERENCE WITH REFERENCE****

FUEL TYPE								
REFERENCE								
SCOUPE								
DIFFERENCE = (SCOUPE - REFERENCE)*100 / REFERENCE								
1 1 11	2 1 9	3 1 5	4 1 4	5 1 7	6 1 5	7 1 5	8 1 9	
9219.0	10984.0	12386.0	13663.0	12767.0	13168.0	11042.0	4499.0	
9604.3	10701.6	12141.8	12000.0	12156.9	12569.3	10598.8	3987.0	
4.2	-2.6	-2.0	-12.2	-4.8	-4.5	-4.0	-11.4	
1 2 9	2 2 8	3 2 8	4 2 12	5 2 8	6 2 5	7 2 2	8 2 9	
10984.0	11878.0	12228.0	9971.0	12277.0	13242.0	12586.0	3890.0	
10708.0	11661.7	11751.5	9039.7	11241.9	12595.3	12243.3	3441.8	
-2.5	-1.8	-3.9	-9.3	-8.4	-4.9	-2.7	-11.5	
1 3 5	2 3 8	3 3 7	4 3 3	5 3 12	6 3 3	7 3 1	8 3 0	
12386.0	12228.0	12509.0	13545.0	10028.0	14182.0	10792.0	0.0	
12169.0	11769.9	12350.6	12359.9	8993.8	12746.9	9875.0	0.0	
-1.8	-3.7	-1.3	-8.7	-10.3	-10.1	-8.5	0.0	
1 4 4	2 4 12	3 4 3	4 4 10	5 4 6	6 4 1	7 4 11	8 4 0	
13663.0	9971.0	13545.0	10158.0	11776.0	12354.0	4232.0	0.0	
12063.1	9082.8	12398.4	9964.4	10930.5	11795.9	4253.0	0.0	
-11.7	-8.9	-8.5	-1.9	-7.2	-4.5	0.5	0.0	
1 5 7	2 5 8	3 5 12	4 5 6	5 5 1	6 5 10	7 5 0	8 5 0	
12767.0	12277.0	10028.0	11776.0	12099.0	5395.0	0.0	0.0	
12268.0	11347.5	9075.1	11009.0	11345.8	4421.4	0.0	0.0	
-3.9	-7.6	-9.5	-6.5	-6.2	-18.0	0.0	0.0	
1 6 5	2 6 5	3 6 3	4 6 1	5 6 10	6 6 0	7 6 0	8 6 0	
13168.0	13242.0	14182.0	12354.0	5395.0	0.0	0.0	0.0	
12730.0	12768.9	12952.8	12019.4	4463.4	0.0	0.0	0.0	
-3.3	-3.6	-8.7	-2.7	-17.3	0.0	0.0	0.0	
1 7 5	2 7 2	3 7 1	4 7 9	5 7 0	6 7 0	7 7 0	8 7 0	
11042.0	12586.0	10792.0	4916.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
10765.2	12459.3	10116.7	4599.6	0.0	0.0	0.0	0.0	
-2.5	-1.0	-6.3	-6.4	0.0	0.0	0.0	0.0	
1 8 9	2 8 9	3 8 0	4 8 0	5 8 0	6 8 0	7 8 0	8 8 0	
4499.0	3890.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
4051.6	3500.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
-9.9	-10.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	

Fig. 18. Calculation Result of Assembly Burnup Distribution at EOC of KORI-4, Cycle-4 : SCOUPE

IV. 결 론

본 연구에서는 유전 알고리즘(Genetic Algorithms)을 이용한 최적화된 핵 연료 재장전 패턴 선정을 위한 전산코드(MGA_SCOUPE)를 개발하여 고리 4 호기 4주기 모델에 적용하여 개발된 코드의 작동 성능을 검증하였다. MGA_SCOUPE 결과는 ROCS 및 SCOUPE의 결과와 비교하여 볼 때, 주기초, 주기말 첨두 출력 밀도의 표준편차가 25.8%, 18.7% 줄일 수 있음을 보였다.

그러나, 본 연구에서 개발된 MGA_SCOUPE 의 노심내 확산 방정식을 풀기 위한 계산 모듈은 주기초, 주기말에서의 출력 분포를 계산하는데 가연성 독물질을 고려하지 않고 계산하였다. 최근에는 노심의 초기 반응도 제어 효과가 크면서 주기말 잔존 독효과가 상대적으로 작은 Gadolinia(Gd)를 독물질로 널리 사용하는 추세이므로, 향후 가연성 독물을 고려한 계산 모듈을 보완해야 할 필요성이 있다.

앞으로 가연성 독물질에 대한 비선형 연소도 모델에 입각한 연소도 계산 모델 등을 연구한 후, 보다 정확하고 실질적인 노심 분석이 가능하도록 본 프로그램을 개선하거나 다른 노심 분석 코드를 선택하여 GA와 결합하면 실제 원자로 발전소에 적용할 수 있는 노심 재장전 패턴을 구할 수 있을 것으로 기대된다.

V. 참고문헌

- Goldberg, 1989, Genetic Algorithm in Search Optimization & machine learning, Addison - Wesley Publishing Co., NY.
- 김석주, 1995, Optimization of Injection Modeling Condition Using Genetic Algorithm 연구, 서울대학교 석사학위논문, pp. 17~33.
- 김창효, 장문희, 1989, 핵공학개론(열출력과 원자로물리), 한국원자력학회, pp. 176~221.
- 김택겸, 1995, 혼합정수계획법에 의한 가압경수로 노심 핵연료관리 최적화 연구, 서울대학교 박사학위논문, pp. 1~9.
- 김재학, 1994, 이중농축도를 이용한 17×17 국산핵연료집합체의 첨두출력 감소 방안에 대한 연구, 한국원자력연구소, pp. 20~56.
- 박홍준, 1992, 최적제어기법과 경험칙을 이용한 최적핵연료 분포 결정 및 목적 출력을 통한 가연성 독봉의 추적에 관한 연구, 서울대학교 석사학위논문, pp. 3~9.
- 백병찬, 김명현, 1990, Reactor Power Calculation Model for the Reloading Pattern Search Expert System, 경희대학교 레이저공학, vol. 1, pp. 65~78.
- 신호철, 김명현, 1991, 핵연료 재장전 모형 선정을 위한 전문가 시스템 개발, 경희대학교 레이저공학, pp. 65~68.
- 이창규, 1993, 노심핵설계 개요(원자로 물리 특강), pp. 39~53.
- 지영준, 김희준, 허정권, 1995, C로 구현한 수치해석, pp. 101 ~ 125.
- P. W. Poon and G. T. Parks, 1993, Application of Genetic Algorithms to

- In-Core Nuclear Fuel Management Optimization, Proc. MEC+SNA
'93, pp. 777~786
- 장문희, 1989, 과도상태 원자로, 한국원자력학회, pp.222~291
- 정병렬, 1991, An Optimization Study on the Management of Burnable
Poisons, 서울대학교 석사학위논문, pp. 74~76.
- Kyung Ho Cho, Sung Tack Ko, and Han Seak Ko, 1996. 4., 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
- 최인규, 조성환, 노승탁, 1990, 열전달, pp. 153 ~ 179.
- 한국원자력연구소, 1978, 원자로의 최적운동을 위한 핵연료 관리연구, 한국원자
력연구소 최종결과 보고서.
- 한국전력공사, 1996, 원자력 에너지, pp. 6~8.
- 한국전력공사 원자력연수원, 1995, 원자로 이론(초급), pp. 245 ~ 246.
- 한국전력공사 원자력연수원, 1995, 원자로 제어, pp. 198~206.
- 홍준표, 1991, 열전달 확산의 수치해석, 반조출판사, pp. 45 ~ 55.

새로이 학업을 시작하겠다고던 어색했던 마음은 어드뎛 사라지고, 2년
어란 시간을 보낸 지금 이 초라한 결실을 대할 때 내 자신은 허탈감이
빠집니다.

보잘것없는 이 한편의 논문이 나오기까지 냉철하고도 심오한 학문
탐구의 길을 열어주신 조경호 교수님께 머리숙여 감사함을 전합니다.
그동안 많은 가르침을 주시고 학문적인 체쩍을 아끼지 않으셨던 이윤준
교수님, 이 현주 교수님, 박재우 교수님, 천 원기 교수님, 김 선 교수님께
감사드립니다. 또한 연구에 관한 자로와 많은 조언을 해주신 경희대학교
김 명현 교수님과 한국원자력연구소 백 병찬 연구원님께도 감사의 뜻을
전합니다. 그리고 세심한 조언을 해주신 김 호찬 교수님과 항상 관심을
보여주신 공과대학 교수님께도 감사의 마음을 전하고 싶습니다.

자료수집에 세심한 배려와 도움을 주신 김 정훈, 나 원우, 김 용수
선배님, 가끔은 후배의 정난끼를 끝질 벗어나주시던 김 석영, 강 견호,
오 원선, 김 경현, 임 재훈, 김 병선 선배님, 김 길현 선배님께도 고마움을
전합니다. 그리고 가끔은 서로에게 좋은 선·후배사이였던 수훈君과
바쁠 때 선배의 일을 서스럼없이 해 주었던 경진君, 영근君, 성민君, 재
성君과 학부 후배들에게도 감사하는 마음을 다시 한번 전합니다.

대학원의 석사과정과 조교생활을 무리없이 할 수 있게 도움을 주신 형
정실 김 석건 계장님, 장 승규 선생님, 오 성진 선생님, 한 회금 선생님과
가끔은 힘에 부쳐 어려워 할 때 충고와 도움을 주신 오 명철 선생님,
강 길선 선생님, 김 운숙 선생님, 임 성원 선생님, 김 태웅 선생님, 그리고

공과대학 모든 조교 선생님과 행정 선생님들께도 감사드립니다.

 막내 동생의 학업을 뒷바라지 해주신 작은 형님 내외분과 큰 형님 내외, 누나와 매형께 감사 드리며, 이 논문을 받아보시고 흐뭇해 하실 할아버지와 아버님, 어머님께 깊이 감사드리며 이 작은 결실을 바칩니다. 마지막으로 이 작은 결실을 고대하면서 지난 수년간을 기다려온 사랑하는 친구 미옥씨와 미옥씨 어머님, 아버님, 그리고 늘 관심을 갖고 어해 해준 친구들, 승후, 전홍, 도현등 대학 동기와 여러 선배님들께도 지면을 통해 고마움을 전합니다.

