

# 플랜트 보호 제어기의 신뢰도분석과 유전알고리즘을 이용한 다중성의 최적화

論 文
49D-9-2

## Optimization of Redundancy by using Genetic Algorithm for Reliability of Plant Protection Controller

柳 東 完\* · 金 東 勳\*\* · 朴 熙 潤\*\*\* · 具 仁 守<sup>§</sup> · 徐 輔 焄<sup>§§</sup>  
(Dong-Wan Ryoo · Dong-Hoon Kim · Heui-Youn Park · In-Soo Koo · Bo-Hyeok Seo)

**Abstract** - The reliability of system is to become a important concern in developed industry. The controller based on the reliability is so important position. PPC(Plant Protection Controller) is for plant protection and human life by fault detection and control action against the transient condition of plant. The protection system of the nuclear reactor and chemical reactor are representative of PPC. This paper presents analysis of PPC reliability, formal problem statement of optimal redundancy based on the reliability for PPC. And the problem is optimized by genetic algorithm. The genetic algorithms is useful algorithm in case of large searching, complex gradient, existence local minimum. The ability and effectiveness of the proposed optimization is demonstrated by the target reliability of one channel PPC, using the failure rate based on the MIL-HDBK-217

**Key Words** : Redundancy, Reliability, Availability, Genetic Algorithm, Plant Protection Controller(PPC), Optimization

### 1. 서 론

현대적인 FA는 여러 종류의 기기가 복합적으로 연계되어 있어 단일기기의 고장에 의한 파급효과가 크다. 즉 예전에 단독으로 운전되는 기계의 고장은 장치의 운용 손실로 끝나게 되지만 요즘의 공장자동화(FA)에서는 전체공장에 치명적으로 작용하고 그로 인한 주변의 손실들이 많이 작용한다. 그리고 복잡하고 정교한 시스템일수록 고장률이 높아지게 되어 시스템의 신뢰도는 중요한 관심사로 등장하게 되었으며 신뢰성에 근거를 둔 제어기의 설계는 중요한 위치를 차지하게 되었다.[1-6] 플랜트 보호 제어기는 플랜트의 여러 상태를 입력 받아 플랜트가 이상동작이 고장과 사고로 진단될 때 제어기가 동작해 플랜트의 동작을 정지시켜 플랜트와 인명 등을 보호하는 제어기이다. 원자력 발전소의 원자로 보호계통, 화학 반응로가 대표적인 예이다.

본 논문에서는 플랜트 보호제어기의 신뢰도를 분석하고, 신뢰도에 근거한 다중성(Redundancy)을 위한 문제설정과 유전알고리즘으로 이를 최적화를 제안하였다.

유전알고리즘은 탐색 공간이 크거나 분석적으로 해를 찾을 수 없는 문제에 대해 유용한 알고리즘이다. 특히 목적함수의 미분치를 구하기 어렵거나, 국부 최소점(Local minimum)이 존재할 경우 유용한 알고리즘이다.[6-10]

다중성의 최적화 목적함수에서는 각각의 다중성에 대해 목적함수의 구조가 바뀌므로 미분치를 구하기가 쉽지 않기 때문에 일반적인 최적화기법을 적용하기 보다 이러한 문제를 해결하기 위해 유전 알고리즘을 사용하였다. 실제 고장률(MIL-HDBK-217)에 근거를 둔 고장률을 사용하여, 구성된 제어기의 모의 한 채널의 신뢰도를 위한 다중성을 최적화함으로써 제안된 문제설정과 최적화기법의 효용성을 확인한다.

### 2. 플랜트 보호 제어기의 신뢰도

플랜트 보호 제어기는 플랜트의 여러 상태를 입력 받아 플랜트가 이상동작이 고장사고으로 진단될 때 플랜트의 동작을 정지시켜 플랜트와 인명 등을 보호하는 제어기이다. 원자력 발전소의 원자로가 대표적인 예이다. 플랜트 보호 제어기는 그림 1과 같이 플랜트의 상태를 입력 받는다. 한 채널의 입력은 벡터 형태이다. 즉 원자력 발전소의 경우, 플랜트보호 제어기로 들어오는 입력변수들의 대표적인 형태는 가변과출력(Variable overpower), 대수출력준위(logarithmic power level), 국부 출력밀도(Local power density), 핵비등 이탈률(DNBR), 가압기의 압력(Pressurizer Pressure), 증기 발생기의 수위, 증기발생기의 압력, 원자로 냉각재 유량 등이다. 이들은 고신뢰도를 위하여는 4개 채널로 들어오며 2 out of 4의 동시논리에 의한 다중성(Redundancy)을 가지는 구조로 구성된다. 네 채널로 구성된 플랜트 보호 제어기는 각 채널별로 동일변수에 대한 독립된 센서를 통해 입력을 받는다. 즉 각 채널의 센서로 들어오는 입력변수벡터(Input1=Input2=Input3=Input4)는 동일하다. 각 채널은 고장 진단기능을 하는 제어기로 동작한다. 그리고 신뢰성을 재고하기 위하여 병렬로 다중화(Redundancy) 시켰다. 동시논

\* 正 會 員 : 韓 國 原 子 力 研 究 所 研 究 員  
 \*\* 正 會 員 : 韓 國 原 子 力 研 究 所 先 任 研 究 員  
 \*\*\* 正 會 員 : 韓 國 原 子 力 研 究 所 責 任 研 究 員  
 § 正 會 員 : 韓 國 原 子 力 研 究 所 責 任 研 究 員 · 工 博  
 §§ 正 會 員 : 慶 北 大 電 子 電 氣 工 學 部 教 授 · 工 博  
 接 受 日 字 : 2000 年 3 月 31 日  
 最 終 完 了 : 2000 年 8 月 28 日

리부(Voter)는 4개중 2개 이상이 일치해야 동작하는 역할을 하는 2/4동시발생논리를 가진다.

바이패스는 운전자가 한 채널을 보수유지 위해 또는 운전자의 판단에 따라 제어기의 동작에서 우회(분리)시킬 필요가 있을 때 분리시키는 역할을 한다.

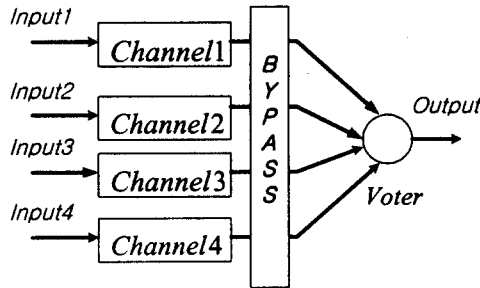


그림 1 플랜트 보호 제어기

Fig. 1 PPC (Plant Protection Controller)

전체시스템은 네 개의 채널로 구성되어 있고, 각 채널은 동일한 형태를 갖는다.

한 개의 채널에 대한 흐름을 간략하게 나타내면, 변수입력 모듈은 디지털 신호처리를 위해 아날로그 측정값을 디지털 변수로 변환하여 디지털 신호를 취득한다. 취득된 설정치 알고리즘에 의해 입력변수에 대한 트립과 예비트립의 상태를 설정치와 비교기능을 수행하여 트립상태를 판단한다. 만일 바이패스가 존재하면 트립은 실질적으로 발생하지 않는다. 트립/예비트립 설정치는 고정설정치, 변화율 제한가변설정치, 수동리셋 설정치와 같이 세 종류로 나누어진다.

측정된 입력값과 설정치를 비교하여 트립, 경보상태를 판단하고, 플랜트에서 들어오는 측정 변수값에 대해 미리 설정치를 가지고 있다. 즉 상한치와 하한치 값을 가지고 있으며, 측정변수가 그 한계치를 넘으면 트립으로 판단한다. 히스테리시스 값은 상태변화를 확실히 판단하기 위한 설정치 변화 값으로 설정치에 따라 양수 혹은 음수 값을 가진다.

히스테리시스 값은 플랜트에서 들어온 입력 측정변수의 값이 설정 상한치에 도달했을 때 설정된 히스테리시스값 만큼 설정치를 낮추게 된다. 설정 상한치가 히스테리시스값 만큼 낮추어진 상태에서 설정치를 넘은 플랜트의 측정변수 값이 바뀐 설정 상한치에 도달하면 설정치의 값은 원래상태로 복원된다. 설정 하한치의 경우도 마찬가지로 입력 측정변수의 값이 설정 하한치에 도달했을 때 설정된 히스테리시스값만큼 설정 하한치가 높아지게 되며 플랜트의 측정변수 값이 바뀐 설정 하한치로 올라가면 설정치의 값은 원래상태로 복원된다. 그리하여 어떤 노이즈나 약간의 유동상태에서도 상태변화를 확실하게 판단할 수 있다. 이 모듈에서 결정된 신호의 그 결과를 보터로 보낸다. 보터는 각 변수별로 할당된 트립을 판단하기 위한 2/4 2/3의 동시논리판단기능을 수행한다.

플랜트 보호 제어기의 목표 신뢰도가 주어졌다고 가정한다 한 채널의 고장률에 따른 전체 신뢰도를 분석한다면 한

채널의 목표 신뢰도를 구할 수 있다. 그러므로 먼저 한 채널의 고장률에 따른 전체 신뢰도를 분석한다.

2.1 정상운전시 플랜트 보호 제어기의 신뢰도

한 채널을 바이패스 시키지 않은 정상상태의 플랜트 보호 제어기의 신뢰도 분석을 위한 마르코프 모델(Markov model)이다. 각 채널 제어기의 고장률을 상수  $\lambda$ 로 가정한다.

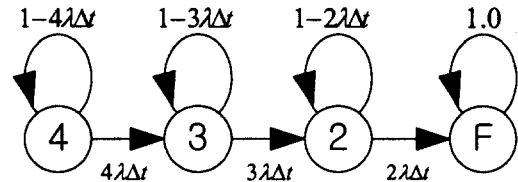


그림 2 정상운전시 플랜트 보호 제어기의 마르코프 모델

Fig. 2 Markov model of normal PPC

아래  $P(t)$ 는 시각  $t$  에 각각의 상태에 있을 확률로 두면, 마르코프 모델에 의한 미분 방정식을 아래 식(1)에서(3)과 같이 둘 수 있다.

$$\frac{dP_4(t)}{dt} = -4\lambda P_4(t) \tag{1}$$

$$\frac{dP_3(t)}{dt} = 4\lambda P_4(t) - 3\lambda P_3(t) \tag{2}$$

$$\frac{dP_2(t)}{dt} = 3\lambda P_3(t) - 2\lambda P_2(t) \tag{3}$$

$$\frac{dP_F(t)}{dt} = 2\lambda P_2(t) \tag{4}$$

여기서 초기값( $t=0$ )은 다음과 같다.

$$P_4(0) = 1, P_3(0) = P_2(0) = P_F(0) = 0$$

식 (1-3)의 해는 식(5-7)과 같다.

$$P_4 = e^{-4\lambda t} \tag{5}$$

$$P_3 = 4e^{-3\lambda t} - 4e^{-4\lambda t} \tag{6}$$

$$P_2 = 6e^{-2\lambda t} - 12e^{-3\lambda t} + 6e^{-4\lambda t} \tag{7}$$

그러므로 정상상태 즉 1채널이 임의로 바이패스 시키지 않았을 때 신뢰도는 각 상태의  $P_4$ 와  $P_3$ 와  $P_2$ 를 모두 더하여 식(8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_{ppc} = P_4 + P_3 + P_2 = 6e^{-2\lambda t} - 8e^{-3\lambda t} + 3e^{-4\lambda t} \tag{8}$$

이 보호 제어기의 MTTF(Mean time to failure) 다음 식(9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$MTTF_{ppc} = \int_0^{\infty} R_{ppc}(t) dt = \frac{13}{12\lambda} \tag{9}$$

그리고 보호 제어기의 정상상태의 가용도(Steady-state availability:  $A(\infty) = A_{ss}$ )는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$A_{ss-bpc} = \frac{MTTF}{MTTF + MTTR} \quad (10)$$

Mean time to repair ( $MTTR = \frac{1}{\mu}$ ), 여기서  $\mu$ 는 수리율 (repair rate)이다.

그림 3은 플랜트 보호 제어기의 시간에 따른 신뢰도를 나타내고 있다.

A는 한 채널의 고장률( $\lambda$ )이  $1 \times 10^{-4}$ 일 때이고, B는  $2 \times 10^{-4}$ , 그리고 C는  $3 \times 10^{-4}$ 일 때의 신뢰도를 나타낸다. 그림 4는 플랜트 보호 제어기의 수리율( $\mu$ )에 따른 정상상태의 가용도를 나타내고 있다.

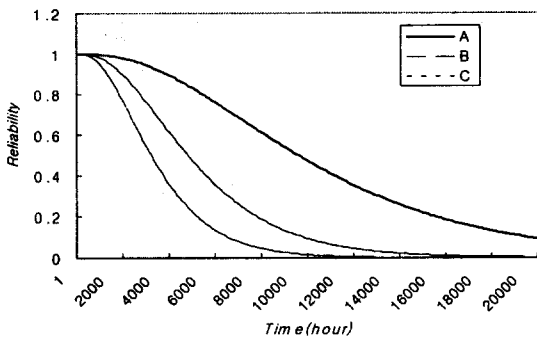


그림 3 PPC의 고장률에 따른 신뢰도  
Fig. 3 Reliabilities of normal PPC according to failure rates

(A:  $1 \times 10^{-4}$ , B:  $2 \times 10^{-4}$ , C:  $3 \times 10^{-4}$ )

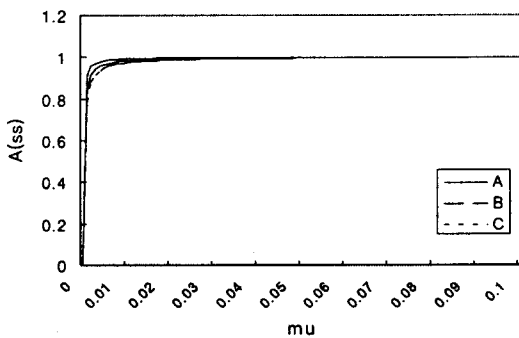


그림 4 PPC의 MTTR(1/mu)에 따른 정상상태 가용도  
Fig. 4 Steady-state availabilities of normal PPC

(A:  $1 \times 10^{-4}$ , B:  $2 \times 10^{-4}$ , C:  $3 \times 10^{-4}$ )

## 2.2 한 채널 Bypass시 보호 제어기의 신뢰도

바이패스는 운전자가 한 채널을 보수유지 위해 또는 운전자의 판단에 따라 제어기의 동작에서 우회(분리)시킬 필요가 있을 때 우회시키는 역할을 하며 한 채널이 바이패스

되었을 때 보호 제어기의 신뢰도 분석을 위한 마르코프 모델(Markov model)이다. 여기서는 2/3의 동시논리로 동작한다.

각 채널 제어기의 고장률을 역시 상수  $\lambda$ 로 가정한다.

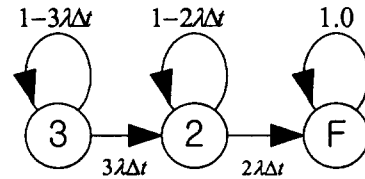


그림 5 한 채널 바이패스시 PPC의 마르코프 모델  
Fig. 5 Markov model of 1 channel bypassed PPC

아래  $P(t)$ 는 시각  $t$ 에 각각의 상태에 있을 확률로 두면, 마르코프 모델에 의한 미분 방정식을 아래 식(11-13)과 같이 둘 수 있다.[3]

$$\frac{dP_3(t)}{dt} = -3\lambda P_3(t) \quad (11)$$

$$\frac{dP_2(t)}{dt} = 3\lambda P_3(t) - 2\lambda P_2(t) \quad (12)$$

$$\frac{dP_F(t)}{dt} = 2\lambda P_2(t) \quad (13)$$

여기서 초기값( $t=0$ )은 다음과 같다.

$$P_3(0) = 1, P_2(0) = P_F(0) = 0$$

식 (11-12)의 해는 식(14-15)과 같다.

$$P_3 = e^{-3\lambda t} \quad (14)$$

$$P_2 = 3e^{-2\lambda t} - 2e^{-3\lambda t} \quad (15)$$

그러므로 1채널이 임의로 바이패스 시켰을 때 신뢰도는 각 상태의  $P_3$ 와  $P_2$ 를 모두 더 하여 식(16)과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_{bypass} = P_3 + P_2 = 3e^{-2\lambda t} - 2e^{-3\lambda t} \quad (16)$$

그리고 바이패스시 보호 제어기의 MTTF 다음 식(17)와 같이 나타낼 수 있으며, 보호 제어기의 정상상태의 가용도 (Steady-state availability:  $A(\infty) = A_{ss}$ )도 역시 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$MTTF_{bypass} = \int_0^{\infty} R_{bypass}(t) dt = \frac{5}{6\lambda} \quad (17)$$

$$A_{ss-bypass} = \frac{MTTF}{MTTF + MTTR} \quad (MTTR = \frac{1}{\mu})$$

그림 6은 바이패스된 플랜트 고장 제어기의 시간에 따른 신뢰도를 나타내고 있다.

A는 한 채널의 고장률( $\lambda$ )이  $1 \times 10^{-4}$ 일 때이고, B는  $2 \times 10^{-4}$ , 그리고 C는  $3 \times 10^{-4}$ 일 때의 신뢰도를 나타낸다.

그림 7은 바이패스된 플랜트 고장 제어기의 MTTR( $1/\mu$ )에 따른 정상상태의 가용도를 나타내고 있다.

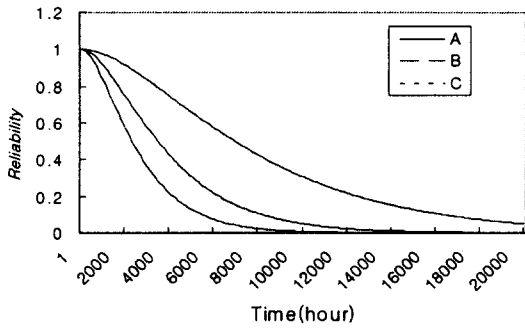


그림 6 바이패스된 PPC의 고장률에 따른 신뢰도  
**Fig. 6 Reliabilities of bypassed PPC**  
 ( A:  $1 \times 10^{-4}$  , B:  $2 \times 10^{-4}$  , C:  $3 \times 10^{-4}$  )

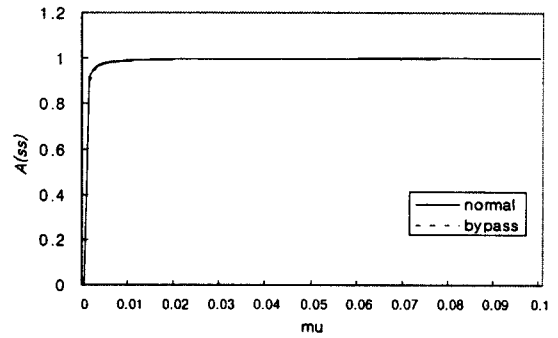


그림 9 정상상태 PPC 와 바이패스된 PPC 가용도 비교  
**Fig. 9 The comparison of availabilities between normal PPC and bypassed PPC**

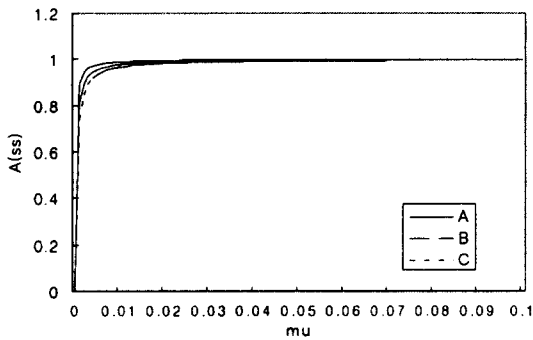


그림 7 Bypassed PPC 의 MTTR에 따른 정상상태 가용도  
**Fig. 7 Steady-state availabilities of bypassed PPC**  
 ( A:  $1 \times 10^{-4}$  , B:  $2 \times 10^{-4}$  , C:  $3 \times 10^{-4}$  )

그림 8은 정상상태의 플랜트 보호 제어기와 한 채널 바이패스된 상태에서의 플랜트 보호 제어기 신뢰도 비교를 나타내었다. 그림 9는 정상상태 가용도를 나타내었다. 여기서 고장률은  $1 \times 10^{-4}$ 이다.

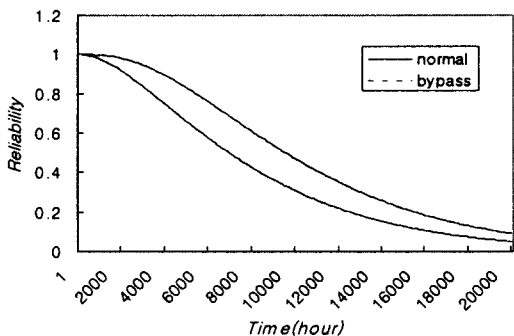


그림 8 정상상태 PPC 와 바이패스된 PPC 신뢰도 비교  
**Fig. 8 The comparison of reliabilities between normal PPC and bypassed PPC**

**3. 문제 설정**

플랜트 보호 제어기의 목표 신뢰도가 주어졌다고 가정하고 한 채널의 고장률에 따른 전체 신뢰도를 분석한다면 한 채널의 목표 신뢰도를 구할 수 있다. 앞 절에서 1채널의 고장률에 따른 전체 신뢰도를 분석하였다. 그러므로 한 채널의 목표신뢰도를 구할 수 있다.

이 절에서는 한 채널의 목표신뢰도가 주어졌을 때 한 채널의 다중성(Redundancy)을 최적화한다. 한 채널의 다중성을 최적화하여 플랜트 보호 제어기의 전체 신뢰도를 목표 신뢰도에 접근 할 수 있을 것이다.

한 채널은 박스 형태로 각각에 다중성(Redundancy)를 가지는 직렬 조합으로 구성된다.

예를 들면 첫 번째 조합은 아날로그 입력을 디지털로 바꾸어 데이터를 얻어 적절한 처리를 하며, 둘째 조합은 실제 제어 알고리즘으로 구성된 제어기로 구성되며 셋째 조합은 출력 인터페이스기능을 하는 조합으로 간주 할 수 있다. 이 절에서는 한 채널의 주어진 목표 신뢰도를 만족하기 위한 다중성을 최적화에 대한 목적함수를 제안하며, 유전알고리즘을 이용한 최적화를 제안한다.

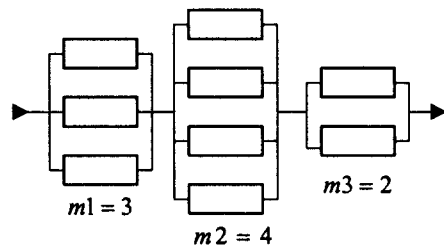


그림 10 다중성을 가지는 직렬 박스로 구성된 PPC 한 채널의 블록도

**Fig. 10 The block diagram of 1 channel with serial box and redundancy in PPC**

그림 10은 다중성을 가지는 직렬 박스로 구성된 PPC 한 채널의 블록도이다. 여기서 m1은 첫 번째 조합의 다중화(redundancy) 개수이며, m2는 두 번째 조합의 다중화 개수이며, m3 세 번째 조합의 다중화 개수이다.

최적화 문제는 식(18)과 같다. 여기서  $m_i$ 는 i번째 조합의 다중화 개수이며,  $w_i$ 는 각각에 대한 가중치 값(weight value)이며, 즉 이것은 설계자가 임의의 조합에 가중치를 줄 수 있다. N은 직렬 조합의 개수이다.

$$\text{Minimize } \left\{ \sum_{i=1}^N w_i m_i \right\} \quad (18)$$

$$\text{subject to } \prod_{i=1}^N R_i(t) \geq R^*$$

$$\text{and } 0 \leq R_i \leq 1 \quad \forall i$$

여기서  $R^*$ 는 한 채널의 목표신뢰도이며  $R_i$ 는 한 채널의 각 i번째 직렬조합의 신뢰도이며, 1/k의 다중성을 갖는다.

식 (18)의 제약 조건을 가지는 최적화 목적함수를 식(19)와 같이 다시 표현한다. 제약조건을 페널티항( $\psi$ )으로 처리한 목적함수로 표현한다.  $\gamma$ 는 페널티항의 가중치이다.

$$\text{Minimize } \left\{ \sum_{i=1}^N w_i m_i + \gamma \psi \left( \prod_{i=1}^N R_i(t) \right) \right\} \quad (19)$$

$$\psi = [\min([\prod_{i=1}^N R_i(t) - R^*], 0)]^2 \quad (20)$$

위의 최적화 문제를 유전 알고리즘으로 해를 구하기 위하여 목적함수를 식(21)과 같이 최대화 문제로 다시 설정한다.

식 (22)는 적합도를 나타내고 있다.

$$\text{Maximize } \left\{ \frac{1}{\sum_{i=1}^N w_i m_i + \gamma \psi \left( \prod_{i=1}^N R_i(t) \right)} \right\} \quad (21)$$

$$\text{Fitness} = \frac{1}{\sum_{i=1}^N w_i m_i + \gamma \psi \left( \prod_{i=1}^N R_i(t) \right)} \quad (22)$$

**4. 유전 알고리즘을 이용한 1채널 다중성의 최적화 기법**

본 장에서는 유전 알고리즘을 이용한 다중성의 최적화 기법에 대해 설명한다.

다중성의 최적화 목적함수에서는 각각의 다중화에 대해 목적함수가 바뀌므로 미분치를 구하기가 쉽지 않기 때문에 일반적인 최적화기법을 적용하기 보다 이러한 문제를 해결하기 위해 유전 알고리즘을 사용하였다. 유전 알고리즘은 본질적으로 강인하고 전역 최적해에 근사한 값을 결정할 수 있으며, 풀고자 하는 문제에 대한 가능한 해들을 염색체로 표현하고 이를 적당한 알고리즘의 변형으로 최적해를 구해 나간다.

자연도태(natural selection)의 유전적인 메카니즘에 기초한 유전 알고리즘은 세대(generation)를 거듭함에 따라 어떤 최적화하는 해에 수렴하는, 또는 도달하는 탐색 알고리즘이

다. 탐색 공간이 크거나 분석적으로 해를 찾을 수 없는 문제에 대해 유용한 알고리즘이다.

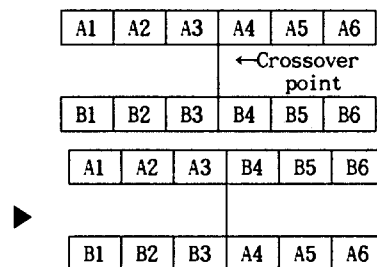
특히 목적함수의 미분치를 구하기 어렵다거나, 국부 최소점(Local minimum)이 존재할 경우 유용한 알고리즘이다.

일반적인 최적화와 탐색 절차들과의 차이는

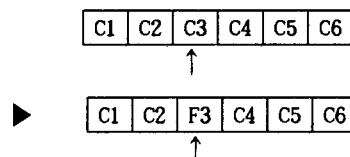
1. 최적화를 위한 변수들을 각 변수들의 벡터로 구성된 단일 염색체 개체(one-chromosome individual)로 표현하여 사용한다.
2. 단일 점이 아닌, 단일 염색체들로 구성된 해집단(population)으로부터 탐색한다.
3. 도함수나 다른 보조적인 지식이 아닌, 목적함수정보를 사용한다.

유전자 알고리즘을 이용하여 최적해를 구하는 과정은 다음과 같다.

- 1) 부호화(Coding) : 문제에 따라 다를 수 있겠지만, 보통 2진수를 이용하여 랜덤하게 해집단을 생성시킨다.
- 2) 평가(Evaluation) : 주어진 목적함수에 대한 각 해의 적합도(fitness)를 평가한다.
- 3) 복제(Reproduction) : 적합도에 따라 염색체들을 랜덤하게 복제한다. (자연생태계의 적자생존의 원리를 이용한 roulette wheel selection 방법을 사용)
- 4) 교배(Crossover) : 두 부모 염색체를 조합하여 새로운 정보를 가진 자식 염색체를 생성한다.



- 5) 돌연변이(Mutation) : 염색체의 일부분을 랜덤하게 변화시켜 다양한 해를 구할 수 있다.



국지 최적해에 빠질 위험이 있으므로 교배와 돌연변이를 이용하여 개체들을 변화시켜 전역적 탐색을 한다. 그리고 특정세대 수행후나 적합도를 평가하여 일정한 세대를 지나도 적합도의 향상이 없을 때 탐색 절차를 끝낸다.

5. 실 데이터를 이용한 모의 1채널 다중성의 최적화

이 절에서는 소자의 실제 고장률을 가지고 모의 한 채널의 다중성을 최적화 한다.

아래에 사용된 고장률은 상용 소프트웨어의 데이터베이스에 의해 주어진 값이다. 그리고 MIL-HDBK-217에 근거하여 구축된 값이며 단위는  $10^6$  시간을 기준으로 한다.

표 1 은 A/D 컨버터와 전원 등으로 구성된 한 채널의 박스1의 구성부품을 나타내고 있으며, 표 2는 한 채널의 박스2의 DSP(320C50)과 메모리, PLD 등으로 구성된 제어 알고리즘을 구현하는 제어기의 부품들로 구성되어 있다. 표 3은 한 채널 박스3의 구성 부품으로 그 외 다른 기능을 한다.

가정:

1. 접합부 (Connection) 고장률은 고려하지 않는다.
2. 동시논리(Voter)의 고장은 제외한다.

표 1 모의 1채널의 Box 1의 부품 구성품과 고장률

Table 1 The units and failure rates of 1 channel- Box 1

Part Number	기능	고장률 ( $10^6$ hour)	개수	조합 고장률 ( $10^6$ hour)
1674	12bit A/D Converter	0.080981	10	0.80981
7770-12	Dual power supervisor	1.101960	1	1.101960
2860	Power supply controller	0.077565	1	0.077565
2544	Power supply circuit	0.057856	1	0.057856
<b>1 채널 Box1의 전체 고장률 : 2.047193</b>				

표 2 모의 1채널의 Box 2의 부품 구성품과 고장률

Table 2 The units and failure rates of 1 channel- Box 2

Part Number	기능	고장률 ( $10^6$ hour)	개수	조합 고장률 ( $10^6$ hour)
320C50	DSP processor	0.609501	4	2.438004
27PC256	PROM	0.121793	16	1.948688
62990	Fast SRAM	0.159277	16	2.548432
7064	PLD	0.173746	4	0.694984
7770-12	Dual power supervisor	1.101960	2	2.20392
2860	Power supply controller	0.077565	2	0.15513
2544	Power supply circuit	0.057856	2	0.11573
<b>1 채널 Box2의 전체 고장률 : 10.104888</b>				

표 3 모의 1채널의 Box 3의 부품 구성품과 고장률

Table 3 The units and failure rates of 1 channel- Box 3

Part Number	기능	고장률 ( $10^6$ hour)	개수	조합 고장률 ( $10^6$ hour)
320C50	DSP processor	0.609501	2	1.219002
27PC256	PROM	0.121793	8	0.974344
62990	Fast SRAM	0.159277	8	1.274216
7064	PLD	0.173746	2	0.347492
7770-12	Dual power supervisor	1.101960	1	1.101960
2860	Power supply controller	0.077565	1	0.077565
2544	Power supply circuit	0.057856	1	0.057856
<b>1 채널 Box3의 전체 고장률 : 5.052435</b>				

표1-3에서 보듯이 각각 박스의 고장률은 차이가 있다. 박스2가 가장 구성 부품이 많으므로 고장률이 높다. 유전알고리즘을 적용하기 위하여 만든 목적함수의  $w_i$ 에 디자이너는 각 박스에 가중치를 줄 수 있다. 즉 고가나 구입이 어려운 부품에 가중치를 높게 주면 다중성의 최적화에 가중치가 높게 작용한다. 본 논문에서는 가중치는  $w_1=1, w_2=1, w_3=1$ 로 하여 계산되었다. 그리고 퍼널티항의 가중치는  $w_4=5 \times 10^3$ 으로 하였다.

표 4은 유전 알고리즘에 사용된 각 파라미터를 나타내고 있다.

표 4 유전 알고리즘의 각 파라미터

Table 4 The parameters of genetic algorithm

Population size	: 100
Probability of crossover $P_c$	: 0.7
Probability of mutation $P_m$	: 0.1
Number of generation	: 100

교배방식은 일반적인 1 포인터 교배이며, 랜덤변수에 의하여 교배 점(crossover point)를 정하였다. 탐색체 코딩은 정수형 탐색체를 사용하였다. N개의 직렬 조합을 가지는 다중성을 위한 탐색체는 예를 들면 "3 2 4 ...N" 같은 형태로 코딩하였고 세대는 100세대로 하였다. 그림11 은 평가함수를 통하여 최대 적합도를 산출한 결과이며, 100세대 후 한 채널의 신뢰도( $R_{ch-1}$ )는 0.9532로 수렴하였으며, 그 결과 적합도는 0.1429이며, 각 박스의 신뢰도는 R1=0.9599, R2=0.9939, R3= 0.9991으로 나타났다. 이때 한 채널의 목표 신뢰도는 시간 20000(Hour)에서 0.95로 하였다. 그리고 최적화된 box1의 개수는 1개, box2의 개수는 3개, box3의 개수는 3개로 나타났다. 1 채널 신뢰도 계산의 경우 n중 k

구조를 가지는 시스템의 경우 모두 n개의 부품중에 k개이상 이 작동해야 체계가 정상적으로 가동된다. 체계가 정상 가동을 하려면 고장부품수가(n-k) 이하이어야 한다. 전체의 신뢰도를 R 부품의 신뢰도를 r이라 하면 전체 신뢰도는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R = \sum_{m=0}^{n-k} \binom{n}{m} r^{n-m} (1-r)^m \quad (23)$$

부품의 신뢰도를 다시 쓰면  $r = e^{-\lambda t}$ 로 나타낼 수 있다. 여기서  $\lambda$ 는 부품의 고장률이다. 그림 10에서 나타나 있듯이 1 채널은 신뢰성을 위하여 1 out of k 의 다중성을 가지는 부품들로 구성된 3개의 직렬 조합을 갖는다,

$$R_1 = \sum_{m=0}^{m_1-1} \binom{m_1}{m} r_1^{m_1-m} (1-r_1)^m \quad (24)$$

$$R_2 = \sum_{m=0}^{m_2-1} \binom{m_2}{m} r_2^{m_2-m} (1-r_2)^m \quad (25)$$

$$R_3 = \sum_{m=0}^{m_3-1} \binom{m_3}{m} r_3^{m_3-m} (1-r_3)^m \quad (26)$$

여기서  $r_1, r_2, r_3$ 는 표 1, 2, 3에 나타나 있듯이 1 채널의 Box 1, 2, 3의 전체 고장률을 나타내고 있다.

1 채널은 3개의 Box로 구성된 직렬 시스템이므로 1 채널 신뢰도는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_{ch1}(t) = R_1(t) * R_2(t) * R_3(t) = \prod_{i=1}^3 R_i(t) \quad (27)$$

위에서 나온 결과를 사용하여, 유전알고리즘에 적용을 위한 1 채널의 적합도 계산은 식22를 사용하여 구할 수 있다.

그림 11에서 유전알고리즘이 적용된 한 채널 신뢰도의 적합도가 수렴하는 것을 나타내었다.

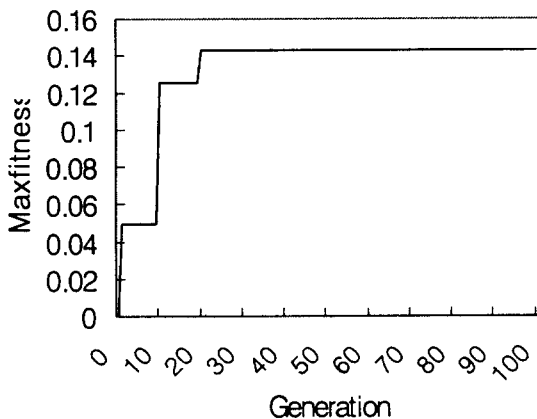


그림 11 유전 알고리즘의 세대에 따른 최대적합도

Fig. 11 The maxfitness versus generation of genetic algorithm

## 6. 결 론

시스템의 신뢰도는 중요한 관심사로 등장하게 되었으며 신뢰성에 근거를 둔 제어기의 설계는 중요한 위치를 차지하게 되었다. 본 논문에서는 플랜트 보호제어기의 신뢰도를 분석하고, 신뢰도에 근거한 한 채널에서의 다중성(Redundancy)

최적화를 위한 문제설정과 유전알고리즘으로 이를 최적화를 제안하였다. 실제 고장률(MIL-HDBK-217)에 근거를 둔 기기 고장률을 사용하여, 구성된 제어기의 모의 1채널의 신뢰도를 위한 다중성을 최적화 함으로써 제안된 문제설정과 최적화기법의 효용성을 확인하였다.

앞으로 추후 연구과제는 플랜트 보호제어기의 안전공학설계에 따른 safety해석, voter의 다중화에 따른 해석, 소프트웨어의 신뢰성에 대한 해석 방법, 제어기 입력 파라미터의 분리(Segmentation)에 따른 해석이다.

### 감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력연구기술개발사업 일환으로 수행되었습니다.

### 참 고 문 헌

- [1] Richard E, Barlow, *Reliability and Decision making*, Chapman & Hall, 1993.
- [2] Patrick D. T, *Practical Reliability Engineering*, John Wiley & Sons, 1996.
- [3] Barry W, Johnson, *Design and Analysis of Fault Tolerance Digital Systems*, Addison Wesley, 1989
- [4] C. Galikowsky "Optimal redundancies for reliability and availability of series systems" *Microelectron. Reliability*, vol. 36, no. 10, pp. 1537-1546, 1996.
- [5] 유동완, 성승환, 김동훈, 박희운, 구인수 "플랜트 보호 시스템의 신뢰도분석과 유전알고리즘을 이용한 다중성의 최적화", 한국원자력학회 춘계학술발표회 논문집, May, 2000
- [6] M. Schoenauer, Z. Michalewicz. "Sphere operators and their applicability for constrained parameter optimization problems." *In 7th Annual Conference on Evolutionary Programming*, 1997.
- [7] Goldberg. D. E. *Genetic algorithms in search, optimization and machine learning*, Addison Wesley, 1989.
- [8] Michalewicz., *Genetic Algorithms+Data Structures=Evolution Programs*, Springer-Verlag, 1994.
- [9] 유동완, 이영석, 박윤호, 서보혁 "유전 알고리즘을 이용한 자기 동조 퍼지제어기의 하이브리드 최적화 기법", 대한전기학회 논문지 vol 48권 no 1호 1999.1
- [10] M. Runwei Cheng., *Genetic Algorithms And Engineering Design*, A Wiley-Interscience Publication, 1996.
- [11] 이정찬 외 "노냉각수 제어시스템의 신뢰도해석에 관한 연구" 한국원자력학회지 Vol. 15, No. 1, pp. 11 - 12 pages, 1983.
- [12] 구인수 외, 일체형원자로 MMIS설계기술 개발 KAERI/RR-1901/98,1999.

저 자 소 개



유 동 완 (柳 東 完)

1968년 10월 4일생 1995년 영남대 공대 전기공학과졸업. 1997년 경북대 대학원 전기공학과졸업(석사). 1999년 동 대학원 박사과정 수료. 1999년~현재 한국원자력연구소 근무

Tel : 042-868-8245, Fax : 042-861-9618

E-mail : rdw@palgong.knu.ac.kr



구 인 수 (具 仁 守)

1953년 5월 6일생. 1977년 경북대 전자공학과 졸업. 1995년 청주대 대학원 전자공학과졸업(석사). 1998년 전자기술사(공업계측제어). 2000년 충남대 대학원 전자공학과 졸업(공학박). 1980년~현재 한국원

자력연구소 책임연구원

Tel : 042-868-2905, Fax : 042-861-9618

E-mail : iskoo@nanum.kaeri.re.kr



김 동 훈 (金 東 勳)

1961년 4월 5일생. 1984년 한국항공대 항공공전과 졸업. 1987년~현재 한국원자력연구소 선임연구원

Tel : 042-868-8252, Fax : 042-861-9618

E-mail : dhkim4@nanum.kaeri.re.kr

서 보 혁 (徐 輔 焯)

1952년 3월 11일생. 1975년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1980년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1985년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 현재 경북대 공대 전자전기공학부 교수

Tel : 053-950-5604, Fax : 053-950-6600

E-mail : bhsuh@bh.knu.ac.kr



박 회 윤 (朴 熙 潤)

1955년 4월 12일생. 1984년 경북대 전자공학과 졸업. 1990년 동 대학원 전자공학과졸업(석사). 1998년 연세대 대학원 전자공학과 박사과정수료. 1986년~현재 한국원자력연구소 책임연구원

Tel : 042-868-2838, Fax : 042-861-9618

E-mail : hypark@nanum.kaeri.re.kr