

운용가상경로와 대체가상경로의 동시 설정을 위한 공진화 알고리즘*

김여근** · 광재승**

A Coevolutionary Algorithm for Working and Backup Virtual Path Routing*

Yeo Keun Kim** · Jai Seung Kwak**

■ Abstract ■

In ATM networks with high capacity, the effect of failures on transmission links or nodes can be catastrophic, so that the issue of survivability is of great importance. In this paper, we consider the routing problem for working and backup virtual paths(VPs). To accomplish a higher survivability, routing the two kinds of VPs should be taken into account at the same time because backup VP routing depends on the working VP routing. A coevolutionary algorithm is employed to solve the problem for simultaneously routing of working and backup VPs. To develop an efficient coevolutionary algorithm for the problem, structure of populations, encoding method, neighborhood, and genetic operators are studied in this paper. The results of extensive experiments are reported. The performance comparison of the proposed algorithm with a conventional genetic algorithm and existing heuristics shows that our approach is promising.

1. 서론

사회가 고도화되고 정보 통신에 대한 사회의 의존

도가 높아짐에 따라 자연적 혹은 인위적 재해로 인
해 통신 장애가 발생하면 경제적 손실은 물론 사회
적 영향이 매우 클 것으로 예상된다. 따라서, 통신

* 본 논문은 정보통신부 '97년도 대학기초연구지원사업의 연구비에 의해 연구되었음.

** 전남대학교 산업공학과

망의 생존도(survivability)는 중요한 문제로 대두되고 있다. ATM 망은 셀 오류 감지, 고유율 적용성(inherent rate adaptation), 비계층적 다중화 등의 특성을 갖음으로써, STM 망에 비해 효과적인 복구기법을 제공할 수 있다는 장점을 갖는다. 이러한 특성은 가상경로(Virtual Path: VP) 설정과 대역폭 할당을 독립적으로 가능하게 한다. 특히 경로와 대역폭 설정의 독립성은 고장 발생시 적은 여유용량으로 빠른 복구가 가능한 복구전략의 수립을 가능하게 한다. 본 연구에서는 ATM망에서 생존도를 고려한 VP 설정문제를 다룬다.

통신망의 복구전략에는 크게 동적(dynamic) 복구전략과 선계획(preplanned) 복구전략이 있다. 동적 복구전략은 고장이 감지되면 동적으로 고장난 링크 혹은 노드와 연결된 인접 노드들간에 복구와 관련된 메시지를 주고 받음으로써 복구경로를 찾는 방법으로 Flooding 알고리즘[8,12]이 이에 속한다. 선계획 복구전략은 쉘의 대역폭을 갖는 복구경로를 미리 설정해 두었다가 고장이 발생하면 설정된 복구경로를 사용하여 빠른 복구를 하는 방법으로 이에 관한 여러 연구[10,11]가 이루어졌다. 선계획 복구전략은 동적 복구전략에 비해 복구시간과 자원 이용 효율면에서 장점이 있다. 본 연구에서도 선계획 복구전략을 사용한다.

지금까지의 많은 연구들은 통신망이 정상 상태일 때 사용되는 운용가상경로(working VP: WVP) 설정문제와 망 요소가 고장 났을 때 WVP를 복구하기 위해 사용되는 대체가상경로(backup VP: BVP) 설정문제를 독립적으로 다루어 왔다[3,4,10,11,14]. 그러나, BVP는 WVP가 설정되고 난 후 남은 링크의 여유용량을 이용하여 설정되기 때문에 그 설정은 WVP의 설정에 종속된다. 따라서, 본 연구에서는 ATM망의 WVP와 BVP의 동시 설정을 위한 효율적인 알고리즘을 개발한다.

VP 설정문제는 조합 최적화문제로서 NP-hard로 알려져 있다[3]. 더욱이, WVP와 BVP를 동시에 설정하는 문제는 훨씬 복잡도가 높아진다. 본인의 조사에 의하면 ATM망에서 WVP와 BVP의 동시

설정에 관한 연구는 단지 Gersht *et al.*[7], Wu *et al.*[17]와 Pai *et al.*[13]의 연구에 불과하다. 그들의 연구[7,17]는 WVP와 BVP를 이용한 망 운영에 관한 구조를 제안하였다. 그러나 이러한 구조하에서의 경로설정을 위한 알고리즘은 제시하지 않고 있다. Pai *et al.*은 다루는 문제를 0-1 정수 계획법으로 수리 모형화하고, Lagrangian Relaxation을 통해 근사 최적해를 구하는 기법을 제안하였다. 그러나 망 크기가 커지면 계산 소요시간이 지수적으로 증가하여 적용에 한계를 갖는다. 따라서, 현실적인 규모의 대형망에서 WVP와 BVP를 빠르고 효율적으로 동시에 설정할 수 있는 알고리즘의 개발이 필요하다. 이를 위해 본 연구에서는 공진화 알고리즘(coevolutionary algorithm)을 이용한다.

공진화 알고리즘은 자연계의 여러 종(species)들이 상호 작용하면서 공진화하는 과정을 모방한 일종의 인공지능 기법으로, 복잡도가 높은 문제를 해결하는데 일부 적용되고 있으나[2,5,9] 이에 관한 연구는 아직 초기 단계이다. 본 연구에서는 WVP와 BVP의 설정문제를 각각 하나의 종으로 보고 이들 두 종을 상호 진화시켜, 즉 서로 다른 두 해공간을 탐색하여 좋은 해를 구하고자 한다. 통신망의 설계 및 운용 문제에 진화 알고리즘을 이용한 여러 연구가 이루어졌다. 예로 통신망 설계와 관련해서는 Tantertdid *et al.*[16]와 Elbaum *et al.*[6] 등의 연구가 있고, 망 운영 및 관리와 관련해서는 Shimamoto *et al.*[15]과 Koh *et al.*[11] 등의 연구가 있다. 그러나 이들 연구들은 단일 종의 진화 과정을 모방한 유전알고리즘(genetic algorithm)을 사용하였다.

본 연구에서는 다루는 문제에 효율적인 공진화 알고리즘의 개발을 위하여, 문제에 적합한 개체 표현 및 모집단 구성 방법, 문제가 가지고 있는 특정 정보의 이용과 모집단 간의 상호작용을 고려한 유전연산자 등에 관하여 연구한다. 그리고, 다양한 실험을 통하여 개발한 알고리즘의 성능을 분석한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제2절에서는 다루는 문제를 기술하고, 제3절에서는 제안된 공진화 알고리즘의 구성 요소에 관하여 설명한다. 제4절에서는 두 모집단의 상호 진화를 위한 유전연산방법과 그 예제를 다룬다. 제5절에서는 제안한 알고리즘의 성능을 비교 분석하고, 마지막 절에서는 결론을 기술한다.

2. 가상경로 설정문제

본 연구에서는 통신망 구조, 각 VP의 양 종단 노드 쌍과 대역폭은 주어졌다는 전제하에서, 망 자원의 효율적 활용과 생존도 향상을 위한 각 VP의 WVP와 BVP의 라우팅(routing)을 동시에 결정한다. 망 구성 요소의 전송 능력 제약과 전송 지연 제약 하에서 WVP는 발생한 트래픽 요구를 최대한 만족시키도록 구성하고, BVP는 망 구성 요소의 고장에 대해 WVP를 최대한 복구할 수 있도록 구성한다. 전송 능력 제약으로는 노드의 VP 스위칭 능력 제약과 링크 용량 제약 등이 있다. 본 연구에서는 스위칭 능력이 충분하다고 가정하고 링크 용량 제약만을 다룬다. 노드의 스위칭 능력 제약은 링크 용량 제약과 같이 노드를 지나는 VP 개수를 제한함으로써 쉽게 반영할 수 있다. 그리고, 전송 지연 제약은 경로가 지나는 홉 수를 제한함으로써 반영한다. 이를 위해 대안경로들 (alternative paths)은 제한된 홉 수를 넘지 않는 경로들로만 구성한다.

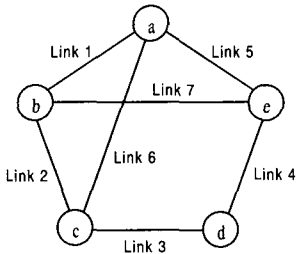
BVP는 고장 시나리오에 의해 평가한다. 고장에는 링크 고장과 노드 고장이 있다. 링크 고장은 노드 고장에 비해 흔히 발생하는 가장 중요한 일반적인 고장 형태이며, 2개 이상의 링크가 동시에 고장날 확률은 매우 낮다[7]. 따라서, 본 연구에서의 고장 시나리오는 고장 확률이 동일한 단일 링크 고장을 가정한다.

선계획에 의한 BVP의 경로설정 방식(rerouting scheme)에는 고장 상황에 종속적인 Local Rerouting, Source-Based Rerouting, Local-Destination

Rerouting 방식들[4]이 있고, 고장 상황에 독립적인 Kawamura *et al.*에 의한 방식[10]이 있다. 전자는 후자의 방식보다 복구율을 더 높일 수 있으나, 많은 메모리와 관리상의 어려움이 있다. 따라서 본 연구에서는 Kawamura *et al.*에 의한 방식으로 BVP를 설정한다. 이 방식은 각 WVP에 대해 대역폭이 작은 BVP를 미리 계획하는 방식이다. 이때 BVP는 WVP가 지나는 노드와 링크를 공유하지 않도록 (단, 양 종단 노드는 제외) 설정함으로써 하나의 BVP만으로 WVP상의 모든 링크와 노드(단, 양 종단 노드는 제외)의 고장에 대한 복구를 가능하게 한다.

예로 [그림 1]을 보자. [그림 1] (a)는 5개의 노드와 7개의 양방향 링크로 이루어진 통신망 구조를 나타낸다. (b)는 VP v 의 양 종단 노드 쌍 - 시작 노드(s)와 끝 노드(t) - 을 연결하는 WVP의 설정을 위하여, VP v 의 k 번째 대안 운용가상경로 (alternative WVP: AWVP)를 $TP(v, k)$ 라 두고, AWVP $TP(v, k)$ 의 h 번째 대안 대체가상경로 (alternative BVP: ABVP)를 $BP(v, k, h)$ 라 두자. 여기서, 각 $TP(v, k)$ 와 $BP(v, k, h)$ 은 이들 대안경로가 점유하는 링크와 노드를 쉽게 파악하기 위하여 노드를 나타내는 문자와 링크를 나타내는 숫자를 결합하여 표현하였다. 예로, $BP(v, k, h) = a(6)c(2)b$ 라고 가정하면, VP v 의 k 번째 AWVP $TP(v, k)$ 의 h 번째 ABVP는 노드 a, c, b와 링크 6, 2를 점유함을 나타낸다. 홉 수 제약은 AWVP와 ABVP에서 각각 2와 3으로 두었고, 대안경로들은 홉 수가 적은 순으로 나열하였다.

본 연구에서는 트래픽 수요를 최대한 제공하면서, 망 구성 요소의 고장으로 인한 장애를 최소화시키도록 각 VP v 마다 WVP와 BVP로서 각기 $TP(v, k)$ 와 $BP(v, k, h)$ 를 하나씩 결정한다. 이때 설정된 WVP의 대역폭 총 합 즉, 설정량이 가능한 최대가 되도록 먼저 고려하고, 다음 고장 시나리오에 의해 고장난 WVP의 대역폭 총 합에 대한 복구된 WVP의 대역폭 총 합 즉, 복구율이 최대가 되도록 BVP를 설정한다.



(a) 양방향 통신망 구조

VP(<i>v</i>): (s,t), BW(Mbps)	TP(<i>t</i> , <i>k</i>)	BP(<i>v</i> , <i>k</i> , <i>h</i>)	
$v=0$ (a,b), 40	$k=0$ a(1)b $k=1$ a(6)c(2)b	$h=0$ a(6)c(2)b $h=0$ a(1)b	$h=1$ a(5)e(7)b $h=1$ a(5)e(7)b
$v=1$ (a,c), 10	$k=2$ a(5)e(7)b $k=0$ a(6)c	$h=0$ a(1)b $h=0$ a(1)b(2)c	$h=1$ a(6)c(3)b $h=1$ a(5)e(4)d(3)c
$v=2$ (a,d), 20	$k=1$ a(1)b(7)c $k=0$ a(5)e(4)d	$h=0$ a(6)c $h=0$ a(6)c(3)d	$h=1$ a(5)e(4)d(3)c $h=1$ a(1)b(2)c(3)d
$v=3$ (a,e), 15	$k=1$ a(1)b(7)c $k=1$ a(6)c(3)d	$h=0$ a(6)c $h=0$ a(5)e(4)d	$h=1$ a(5)e(4)d(3)c $h=1$ a(1)b(7)e(4)d
$v=4$ (b,c), 30	$k=0$ a(5)e $k=1$ a(1)b(7)c	$h=0$ a(1)b(7)e $h=0$ a(5)e	$h=1$ a(6)c(3)d(4)e $h=1$ a(6)c(3)d(4)e
$v=5$ (b,d), 5	$k=0$ b(2)c $k=1$ b(1)a(6)c	$h=0$ b(1)a(6)c $h=0$ b(2)c	$h=1$ b(7)e(4)d(3)c $h=1$ b(7)e(4)d(3)c
$v=6$ (b,e), 25	$k=0$ b(2)c(3)d $k=1$ b(7)e(4)d	$h=0$ b(7)e(4)d $h=0$ b(2)c(3)d	$h=1$ b(1)a(5)e(4)d $h=1$ b(1)a(6)c(3)d
$v=7$ (c,d), 35	$k=0$ b(7)e $k=1$ b(1)a(5)e	$h=0$ b(1)a(5)e $h=0$ b(7)e	$h=1$ b(2)c(3)d(4)e $h=1$ b(2)c(3)d(4)e
$v=8$ (c,e), 40	$k=0$ c(3)d $k=1$ c(3)d(4)e	$h=0$ c(2)b(7)e(4)d $h=0$ c(6)a(5)e	$h=1$ c(6)a(5)e(4)d $h=1$ c(2)b(7)e
$v=9$ (d,e), 15	$k=0$ c(3)d(4)e $k=2$ c(6)a(5)e	$h=0$ c(3)d(4)e $h=0$ c(3)d(4)e	$h=1$ c(6)a(5)e $h=1$ c(2)b(7)e
	$k=0$ d(4)e $k=1$ d(3)c(2)b(7)e	$h=0$ d(3)c(2)b(7)e $h=0$ d(3)c(2)b(7)e	$h=1$ d(3)c(2)b(7)e $h=2$ d(3)c(2)b(7)e

(b) 대안 운용 및 대체가상경로

[그림 1] 양방향 통신망 구조 및 대안경로

3. 공진화 알고리즘

3.1 개념과 절차

고전적 유전알고리즘의 진화 과정은 하나의 모집단이 하나의 고정된 환경에 적응되며, 각 개체는

다른 개체들과는 독립적으로 적응도가 평가되었다. 실제로 자연계는 여러 종들이 내부의(같은 종 내에서) 또는 외부의(다른 종 간의) 환경에 상호작용(interaction)하고 상호적응(co-adaptation)하면서 진화해 나간다. 즉, 어떤 주어진 모집단의 환경은 동시대에 물리적인 환경을 함께 점유하고 있는 다른 모든 종들을 포함하고, 이러한 모집단들은 생존을 위해 동시에 진화하게 된다. 공진화 알고리즘은 생물의 공진화 과정을 모방한 탐색 기법이다[2].

ATM 망에서 BVP는 WVP에 종속적이다. 즉, VP는 WVP와 BVP의 쌍으로써 나타내야 한다. 따라서 진화 알고리즘에서 하나의 개체(VP)는 두개의 염색체(WVP와 BVP의 염색체)를 갖게 된다. 이들 두 염색체를 묶어 하나의 개체로 표현하고, 이들 개체들로 단일 모집단을 구성하여 운영하는 전통적 진화 알고리즘을 사용할 수 있다. 그러나 이러한 진화 알고리즘은 해의 탐색 능력이 좋지 않은 결과를 보였다. 이에 관해서는 제5장에서 그 결과를 보이겠다. 따라서 본 연구에서는 WVP와 BVP로 각기 이루어진 두 모집단을 구성하여 모집단 내에서와 모집단間에서의 개체들의 상호작용과 상호적응을 통해 해의 진화속도를 가속화 시키고, 조기수렴을 방지할 수 있는 공진화 알고리즘을 제안한다.

제안한 공진화 알고리즘의 적용 절차는 다음과 같다.

단계 1 (초기모집단 구성)

WVP개체로 이루어진 모집단 Pop_A 와 BVP개체로 이루어진 모집단 Pop_B 를 각기 torus 형태의 2차원 격자(two-dimensional toroidal grid)구조로 구성한다. 두 모집단의 각 셀(grid cell)에는 하나의 개체를 둔다.

단계 2 (이웃 정의)

모집단내에 있는 하나의 위치(i, j)를 임의로 선택하여 Pop_A 와 Pop_B 에서 그 위치에 있는 셀(개

체)과 주변의 셀들로 구성된 부분모집단(이웃), NT_{ij} 와 NB_{ij} 로 각각 정의한다.

단계 3 (개체 평가)

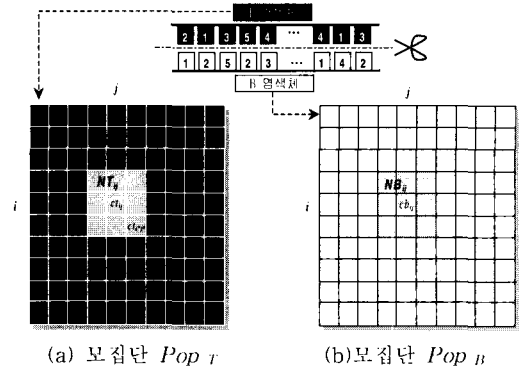
NT_{ij} 에 있는 모든 개체들을 평가하여(이 때의 평가값은 WVP의 설정량이다) 가장 좋은 하나의 개체 ct_{ij} 를 구한다. 이 개체를 NB_{ij} 의 환경으로 두고, ct_{ij} 에 대해 NB_{ij} 에 있는 모든 개체들을 평가한다(이때의 평가값은 BVP에 의한 고장난 WVP의 복구율이고, 정의된 두 이웃으로부터 설정량과 복구율이 가장 우수한 개체로 각기 이루어진 쌍이 가장 좋은 해가 된다). 종료 조건을 만족하면 끝낸다.

단계 4 (유전 연산)

개체 평가로부터 구한 유용한 정보를 이용하여 좋은 스키마를 추출하고, 이를 이용하여 이웃에 있는 개체들을 진화시킨다. 단계 2로 간다.

[그림 2]는 WVP와 BVP 모집단 Pop_T 과 Pop_B 의 구성과 특정 개체의 이웃의 예를 보여주고 있다.

제안된 공진화 알고리즘은 여러 개체들로 이루어진 이웃(부분 모집단) 단위로 운용된다. 이와 같이 모집단을 이웃으로 나누어 진화시키는 방법은 Davior[5]의 ECO(ECOsystem)GA에 기초하고 있다. ECOGA는 일종의 안정상태 유전알고리즘(Steady-State GA)이다. 고전적 유전알고리즘에서는 각 세대에 모집단의 모든 개체가 재생산되나, 안정상태 유전알고리즘은 각 세대에 모집단의 일부 개체만이 재생산되는 알고리즘이다. ECOGA는 초우수 개체에 의해 모집단이 극소취적으로 조기수렴하는 것을 방지하며, 다양한 해를 탐색할 수 있다는 장점을 갖는다. 그리고 본 연구에서는 해의 진화속도를 가속화시키기 위하여 이웃에 있는 개체들로부터 좋은 스키마들을 추출하여, 이들을 이웃에 있는 개체에 전파하는 전략을 사용한다.



[그림 2] 제안된 공진화 알고리즘의 개념과 구성 요소

제안된 공진화 알고리즘의 개체 표현과 평가 방법은 다음과 같다. 그리고 유전 연산 방법은 제4장에서 자세히 다룬다.

3.2 개체 표현

특정 문제에 공진화 알고리즘을 적용하기 위해서는 먼저, 문제의 잠재해를 개체로 표현(encoding)해야 한다. 개체 표현은 개체 평가와 유전 연산에 크게 영향을 주므로 문제의 특성이 잘 반영될 수 있도록 하여야 한다. 본 연구에서는 WVP의 모집단 Pop_T 에 있는 개체 ct_{ij} 와 BVP의 모집단 Pop_B 에 있는 개체 cb_{ij} 를 적절히 표현해야 한다. 표현은 [그림 3] (a)와 같이 한다. 각 개체를 구성하는 인자의 개수(인자수)는 망에서 운용되는 VP의 개수와 같고, 각 개체의 인자에 표현된 값(인자값)은 인자 위치에 대응하는 AWVP와 ABVP를 나타내고자 한다. ct_{ij} 와 cb_{ij} 의 v 번째 인자값을 ct_{ijv} 와 cb_{ijv} 로 각각 두자. 이들 인자값을 나타내는 한 방법으로 ct_{ijv} 를 v 번째 VP의 AWVP 번호로 나타내고, cb_{ijv} 를 ct_{ijv} 의 AWVP 아래서 ABVP의 번호로 나타낼 수 있다. 여기서, 대안 경로는 홑수 제약하에서 최단경로를 구하는 방법에 의하여 구하며, 이들 대안 경로들은 이미 주어졌다고 본다.

이 방법은 대안경로번호를 그대로 인자값으로 사용하기 때문에 개체 표현과 해석이 용이한 반면, 다음과 같은 문제점을 가지고 있다. 각 VP마다

AWVP의 개수가 다르고, 또한 AWVP마다 ABVP 개수가 다르다. 따라서, WVP가 변할 때 BVP를 항상 함께 묶어서 유전 연산을 하지 않으면, 비가능 개체가 생산될 수 있다. 본 연구에서는 이와 같은 문제점을 해결하기 위해 개체의 인자값은 0부터 $r-1$ 사이의 정수로서 표현한다. 여기서 r 은

$$r = \text{MAX}\{ |TP(v, \cdot)|, |BP(v, k, \cdot)| \}$$

for all v, k

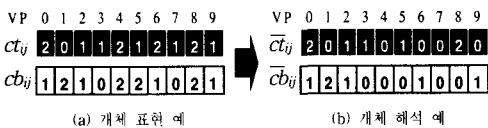
로 둔다. 여기서 $|TP(v, \cdot)|$ 는 각 VP v 의 AWVP 개수이고, $|BP(v, k, \cdot)|$ 는 $TP(v, k)$ 의 ABVP 개수이다. 이와 같이 표현된 인자값의 해석은

$$\overline{ct}_{ijv} = ct_{ijv} \text{ mod } |TP(v, \cdot)|,$$

$$\overline{cb}_{ijv} = cb_{ijv} \text{ mod } |BP(v, k, \cdot)|$$

와 같이 한다. 여기서, $(a \text{ mod } b)$ 는 a 를 b 로 나눈 나머지이다. 즉, ct_{ij} 개체에서 v 번째 VP의 WVP로는 \overline{ct}_{ijv} 번째 AWVP를 사용하고, 이 WVP의 BVP로는 \overline{cb}_{ijv} 번째 ABVP를 사용하는 것으로 해석한다.

[그림 3]은 [그림 1]에 제시된 문제를 개체로 표현하고 해석한 것이다. [그림 1]에서 최대 대안경로 개수, $r = 3$ 이므로, [그림 3] (a)에 표현된 개체는 0, 1, 2의 인자값들로 구성된다. 개체 해석의 예를 VP 6의 인자값에 대해 살펴보자. (a)에 표현된 인자값, $ct_{i6} = 2$ 는 $|TP(6, \cdot)| = 2$ 이므로 (b)에서와 같이 인자값 $\overline{ct}_{i6} = 0 (= 2 \text{ mod } 2)$ 으로 해석된다. 따라서, VP 6의 WVP는 AWVP, $TP(6, 0)$ 를 설정함을 나타낸다. 그리고 (a)에 표현된 인자값, $cb_{i6} = 1$ 은 해석된 인자값 $\overline{cb}_{i6} = 0$ 에 의해 $|BP(6, 0, \cdot)| = 2$ 이므로 (b)에서와 같이 인자값 $\overline{cb}_{i6} = 1 (= 1 \text{ mod } 2)$ 로 해석된다. 따라서, VP 6의 BVP는 ABVP, $BP(6, 0, 1)$ 을 설정함을 의미한다.



[그림 3] 개체 표현과 해석

3.3 개체 평가

다루는 문제는 먼저 WVP의 설정을 최대로 하고, 다음은 이 WVP 하에서 ABVP를 사용할 때 링크 고장에 대한 복구율을 최대로 하고자 한다. 한 쌍의 WVP와 BVP의 개체, ct_{ij} 와 cb_{ij} 가 주어졌다 하자. 이들 개체 평가를 위하여 먼저 WVP의 개체, ct_{ij} 를 평가하여 설정량을 구하고, 설정 후 각 링크의 여유용량에 대해 BVP의 개체, cb_{ij} 를 평가하여 복구율을 구한다. 그런데 개체 평가 시 각 VP는 대역폭이 다르고 여러 링크를 점유하기 때문에 어떤 VP를 먼저 할당하느냐 즉, VP의 할당 순서와 복구 순서에 따라 각각 설정량과 복구율이 다르게 계산될 수 있다. 이 문제는 일종의 packing 문제이다. 본 연구는 이러한 문제에 효율적인 것으로 알려진 First-Fit Decreasing 규칙에 기초한 발견적 기법을 사용한다.

모집단 Pop_T 에 있는 개체 ct_{ij} 의 평가는 아래와 같이 행한다. 개체에 표현된 인자들을 해석하고, VP들을 대역폭 감소순으로 나열한 리스트를 만든다. 리스트에서 가장 먼저 나열된 VP를 선택한다. 선택된 AWVP를 설정한다. 이때 특정 경로의 링크 용량 제약을 위반하면 이 WVP는 설정되지 못한다. 리스트에서 조사된 VP를 제거한다. 같은 방법으로 리스트가 비워질 때까지 이 과정을 반복한다. 설정이 완료되면, 설정된 WVP의 대역폭 총 합 즉, 설정량을 WVP 개체의 평가값으로 둔다.

다음은 BVP 개체, cb_{ij} 의 평가이다. 이를 위하여 이 BVP를 사용하는 WVP 개체, ct_{ij} 를 평가한 후 각 링크에 남은 여유용량을 가지고 각 링크 고장에 대한 복구율을 계산한다. 개체 cb_{ij} 의 평가는 아래와 같이 행한다. 먼저 개체에 표현된 인자들을 해석한다. 그리고 각 링크 고장에 대해 다음의 절차를 반복하여 복구해야 할 대역폭 총 합과 복구된 대역폭 총 합을 각각 구한다. 하나의 고장난 링크를 점유하는 WVP들을 구하여 대역폭 감소순으로 나열한 리스트를 만든다. 리스트에서 가장 먼저 나열된 BVP를 선택한다. 선택된 ABVP가 지나가는 링

크의 여유용량 내에서 설정될 수 있는지를 조사한다. 설정될 수 있으면 이를 설정하고 해당 링크의 여유용량을 수정한다. 그렇지 못하면 이에 대응하는 WVP는 복구되지 못한다. 리스트에서 조사된 VP를 제거한다. 같은 방법으로 리스트에 설정할 VP가 없을 때까지 반복한다. 모든 VP가 평가되었으면, 고장 링크를 달리하여 위의 과정을 모든 링크 고장에 대해 반복 적용한다.

이 BVP 개체의 평가값은 복구율로써, 모든 링크 고장에 대해 복구된 WVP들의 대역폭 총 합을 고장난 WVP들의 대역폭 총 합으로 나눈 값으로 둔다. 통신망 설계시 흔히 상당량의 여유용량이 주어진다. 따라서 WVP의 100% 설정은 최선의 복구를 행할 수 있는 BVP의 설정보다는 비교적 용이하다. 이러한 특성은 유전 연산자를 개발할 때 중요하게 고려된다.

4. 유전연산

좋은 해를 탐색하기 위하여 유전연산에서는 해 공간의 이용(exploitation)과 탐색 (exploration)이 조화를 이루어야 한다[1]. 특히, 공진화 알고리즘에서는 다른 종과의 상호 작용이 유전연산에서 중요하게 다루어져야 한다. 앞에서 언급하였듯이 WVP의 최대 설정보다는 복구율을 최대로 하는 BVP의 설정에 보다 많은 노력이 요구된다. 이를 위하여 유전연산에서 WVP의 이웃에 속하는 개체들은 가능한 유사한 인자형을 갖도록 하고, BVP의 이웃에 속하는 개체들은 가능한 다양한 인자형을 갖도록 한다.

BVP개체는 링크 고장 시나리오에 따라 링크 개수만큼 평가가 반복되고, 각 링크 고장에 대해 그 링크를 경유하는 WVP의 인자들에 의해 평가된다. 따라서 본 연구에서는 평가 과정에서 구해지는 정보를 이용하여 각 링크를 경유하는 WVP의 인자들로 스키마를 구성하고, 이들 중에서 좋은 스키마를 추출하여 유전연산 시킨다. 물론 하나의 VP는 여러 링크를 경유하기 때문에 이때 사용된 정보는 국소 정보가 된다.

4.1 유전연산 절차

제안된 유전연산자의 적용 절차는 다음과 같다.

단계 0 (초기화)

- 0-1: 모집단에서 임의로 위치(i, j)를 선택하고, 그 위치에 있는 개체 ct_{ij} 와 cb_{ij} 의 이웃 NT_{ij} 와 NB_{ij} 를 정의한다.
- 0-2: NT_{ij} 에 있는 개체를 해석하고 평가하여, WVP의 설정량이 가장 많은 개체 ct_{ijs} 를 선택한다. 복수개이면 임의로 선택한다.

단계 1 (Pop_r 에서의 유전연산)

- 1-1: 개체 쌍($ct_{ijs}, cb_{rs} \in NB_{ij}$)의 WVP와 BVP를 사용할 때, 각 링크 고장에 따른 복구량을 계산하여, 복구되지 못한 양이 최대인 링크, $l_{rs}^{(T)}$ 고장을 구한다.
- 1-2: 개체 ct_{ijs} 의 인자들 중에서 링크 $l_{rs}^{(T)}$ 를 경유하는 WVP에 대응하는 인자를 제외한 모든 인자들을 개체 ct_{rs} 에 복사한다.
- 1-3: 이웃 NT_{ij} 에 있는 모든 개체에 대해 단계 1-1과 1-2를 반복 수행한다.

단계 2 (복구율이 높은 개체 집합 Q 생성)

- 2-1: 개체 ct_{ijs} 의 WVP를 사용할 때, 각 링크 l 고장에 대해 NB_{ij} 에 있는 개체 중에서 복구율이 가장 우수한 개체 $q^{(l)} \in NB_{ij}$ 를 선택한다. 복수개 존재하면 임의로 선택한다.
- 2-2: 모든 링크 l 고장에 대해 복구율이 가장 우수한 개체 $q^{(l)}$ 를 구하여, 이들 개체의 집합을 $Q(\subseteq NB_{ij})$ 로 둔다.

단계 3 (스키마 집합 SQ 생성)

- 3-1: 단계 2의 결과로부터 $cb_{pq} \in Q$ 의 개체에서 각 링크 고장에 대해 가장 높은 복구율을 가져오는 링크 집합 $L_{pq}^{(B)}$ 를 구한다.
- 3-2: 개체 ct_{ijs} 에서 링크 $L_{pq}^{(B)}$ 를 지나는 WVP와 같은 위치에 있는 개체 cb_{pq} 의 인자들로

구성된 스키마 sb_{pq} 를 만든다.

- 3-3: Q 에 있는 모든 개체에 대하여 단계 3-1과 3-2를 반복해서 스키마 집합 SQ 를 만든다.

단계 4 (Pop_B 에서의 유전연산)

- 4-1: 개체 $cb_{rs} \in NB_{ij}$ 에 스키마 $sb_{pq} \in SQ$ 를 복사할 경우, $L_{pq}^{(B)}$ 의 고장에 대해 개선된 복구량 rf_{rs}^{pq} 를 계산한다. 이를 SQ 에 있는 모든 스키마에 대해 적용하여 개선된 복구량을 각각 구한다.
- 4-2: 복구량을 가장 많이 개선시킨 스키마를 선택하여 개체 cb_{rs} 에 복사한다.
- 4-3: NB_{ij} 에 있는 모든 개체에 대하여 단계 4-1과 4-2를 반복 수행한다.

단계 1에서는 이웃 NT_{ij} 에 있는 개체들은 가장 우수한 개체 $ct_{i,j}$ 에 있는 인자들 중에서 하나의 링크 $l_{rs}^{(T)}$ 를 지나는 WVP와 같은 위치에 있는 소수의 인자들을 제외하고 대부분 대체되기 때문에 유사한 인자형(genotype)을 가지게 된다. 이때, WVP 개체는 동일한 위치의 BVP 개체를 평가한 결과가 반영되도록 한다.

단계 2와 3은 단계 4를 위한 예비 단계로서, BVP 이웃에 있는 개체로부터 각 링크 고장에 대해 가장 우수한 개체를 선택한 후, 개체별로 링크 고장에 대해 가장 우수한 유전 인자를 추출하여 스키마 집합을 만든다. 이때, 각 스키마는 하나의 개체에 있는 인자의 일부로 구성된다. 단계 4에서는 스키마 집합을 이용하여 BVP 이웃에 있는 각 개체들을 복구율이 향상되도록 유전연산 시킨다. BVP의 유전연산에서는 이웃 NB_{ij} 에 있는 각 개체들은 이웃내의 다른 개체로부터 링크 집합 $L_{pq}^{(B)}$ 에 있는 여러 개의 링크들을 지나는 WVP와 같은 위치에 있는 많은 인자들이 대체되기 때문에 다양한 인자형을 가지게 된다. 결국, 이웃 NB_{ij} 의 다양한 개체들은 유사한 환경(인자형이 유사한 이웃 NT_{ij} 개체들)을 갖게 된다.

제시한 유전연산 과정은 NT_{ij} 에서 가장 좋은 개

체를 선택하여 이를 기준으로 좋은 WVP와 BVP를 찾는다. 이는 WVP의 설정을 먼저 고려함으로써, 결국 WVP의 설정을 주 목적으로 하고 다음에 대한 BVP를 찾는 효과를 가져온다.

일반적으로 유전연산이 유전공학에서와 비슷하게 특정 요소(여기서는 어떤 고장 링크)에 영향을 주는 인자들(스키마)만을 추출하여 자손에 상속하면 좋은 해의 이용 측면에서는 좋으나, 다양한 해공간의 탐색 측면에서는 좋지 않는 결과를 초래할 수 있다. 그러나 본 연구에서 다루는 문제에서는 어떤 개체에서 일부 인자의 변화는, 즉 VP의 변화는 그 VP가 지나는 링크들을 경유하는 모든 VP들에 영향을 주므로 결과적으로 다양한 해공간을 탐색하도록 한다. 예비실험 결과, 다루는 문제에서는 중요 유전연산자인 돌연변이(일부 인자를 임의로 변경하는 연산자)를 사용하면 오히려 해의 진화속도가 느려지면서 더 좋은 해를 생산하지 못하였다.

4.2 예제

본 절에서는 [그림 1]에 제시된 문제를 사용하여 유전연산 과정의 예를 보인다. 모든 링크에 포설된 링크 용량은 100 Mbps로 둔다. 그리고 이웃은 어떤 위치 (i, j) 가 선택되면, 위치 $(i, j-1)$, (i, j) , $(i, j+1)$ 에 있는 3개의 개체로 둔다.

단계 0 (초기화)

- 0-1: 위치 $(2,3)$ 이 선택되고, 이웃 $NT_{2,3}$ 과 $NB_{2,3}$ 은 각각 $ct_{2,i}$, $cb_{2,i}$, $i=2,3,4$ 가 된다.

- 0-2: 이웃 개체들은 아래와 같이 해석된다고 하자.

$$\overline{ct}_{2,2}: (0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0),$$

$$\overline{ct}_{2,3}: (1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0),$$

$$\overline{ct}_{2,4}: (2 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 2 \ 0),$$

$$\overline{cb}_{2,2}: (1 \ 2 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 1),$$

$$\overline{cb}_{2,3}: (0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 2),$$

$$\overline{cb}_{2,4}: (1 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0).$$

그러면 이웃 $NT_{2,3}$ 에 있는 모든 개체는

100% WVP 설정이 가능하므로, 임의로 $ct_{2,3^*} = ct_{2,4}$ 로 둔다.

다음에 제시될 단계1부터 4까지의 이해를 돕기 위하여, <표 1>은 $ct_{2,4}$ 에 대해 $NB_{2,3}$ 에 있는 각 개체들의 평가 결과를 나타내고 있다. 표에서 2열은 고장난 링크를 경유하는 WVP 번호와 대역폭을 나타내고 3, 4, 5열은 $NB_{2,3}$ 에 있는 각 개체들을 링크 고장별로 평가하였을 때 복구된 VP 번호를 나타낸다. ΣBW 는 모든 링크 고장에 대해, 2열은 고장난 VP들의 대역폭 총 합을 나타내고 3, 4, 5열은 각 개체별로 복구된 VP들의 대역폭 총 합을 나타낸다. $l_{r,s}^{(T)}$ 는 $NB_{2,3}$ 에 있는 각 개체별로 복구되지 못한 양이 가장 많은 링크 번호(†표시)이다. 예를 들어, $NB_{2,3}$ 에 있는 개체 $cb_{2,2}$ 가 링크 1, 2, ..., 7 고장에 대해 복구하지 못한 대역폭은 각각 0, 30, 0, 0, 80, 50, 40 (Mbps)이다. 따라서 미 복구량의 최대는 링크 5의 고장이므로 $l_{2,2}^{(T)}=5$ 가 된다. 그리고, $L_{pq}^{(B)}$ 는 $cb_{pq} \in NB_{2,3}$ 가 $NB_{2,3}$ 의 다른 개체들보다 가장 많이 복구 시킨 링크 고장들의 집합(*표시)을 나타낸다. 예를 들어, 개체 $cb_{2,3}$ 은 링크 5, 6과 7의 고장에 대해 $NB_{2,3}$ 에 있는 다른 개체 $cb_{2,2}$, $cb_{2,4}$ 에 비해 복구율이 가장 높다. 따라서, $L_{2,3}^{(B)}=\{5,6,7\}$ 이 된다.

<표 1> $ct_{2,4}$ 에 대해 $NB_{2,3}$ 에 있는 개체들을 평가한 결과

고장링크	고장난 VP번호 (대역폭:Mbps)	복구된 VP 번호 v		
		$cb_{2,2}$	$cb_{2,3}$	$cb_{2,4}$
1	3(15)	3 ^(*)	3	3
2	4(30)	-	- ^(†)	4 ^(*)
3	2(20)	2 ^(*)	2	-
4	9(15), 5(5)	9,5	9,5	9,5 ^(*)
5	0(40), 8(40)	- ^(†)	0,8 ^(*)	8
6	8(40), 2(20), 1(10)	2	8,2 ^(*)	8,1
7	0(40), 6(25), 3(15), 5(5)	6,3,5	0,6,3,5 ^(*)	3,5 ^(†)
ΣBW	320 Mbps	120 Mbps	280 Mbps	175 Mbps
$l_{r,s}^{(T)}$		$l_{2,2}^{(T)}=5$	$l_{2,3}^{(T)}=2$	$l_{2,4}^{(T)}=7$
$L_{p,q}^{(B)}$		$L_{2,2}^{(B)}=\{1,3\}$	$L_{2,3}^{(B)}=\{5,6,7\}$	$L_{2,4}^{(B)}=\{2,4\}$

단계 1 (Pop_1 에서의 유전연산)

- 1-1: $cb_{2,2}$ 는 링크 5가 고장일 때 미 복구량이 80(Mbps)로 최대이므로, $l_{2,2}^{(T)}=5$ 임.
- 1-2: $ct_{2,4}$ 에서 링크 $l_{2,2}^{(T)}=5$ 를 지나는 VP 0과 8에 대응하는 인자를 제외하고, 기존의 $ct_{2,2}$ 에 복사하여 새로운 $ct_{2,2}$ 를 생산함.
 $ct_{2,2} : (0 \text{ * * * * * } 1 \text{ *}) + ct_{2,4} :$
 $(*0110100*0) \rightarrow ct_{2,2} : (0011010010)$
- 1-1: $cb_{2,3}$ 은 링크 2가 고장일 때 미 복구량이 30(Mbps)로 최대이므로, $l_{2,3}^{(T)}=2$ 임.
- 1-2: $ct_{2,4}$ 에서 링크 $l_{2,3}^{(T)}=2$ 를 지나는 VP 4에 대응하는 인자를 제외하고, 기존의 $ct_{2,3}$ 에 복사하여 새로운 $ct_{2,3}$ 를 생산함.
 $ct_{2,3} : (* * * * 1 \text{ * * * * *}) + ct_{2,4} :$
 $(2011*10020) \rightarrow ct_{2,3} : (2011110020)$

단계 2 (복구율이 높은 개체 집합 Q 생성)

- 2-1: 링크 1의 고장에 대해 $cb_{2,2}$, $cb_{2,3}$, $cb_{2,4}$ 의 복구율이 모두 100%이므로, $q^{(1)}=cb_{2,2}$ 를 임의로 선택함.
- 2-1: 링크 2의 고장에 대해 $cb_{2,2}$, $cb_{2,3}$, $cb_{2,4}$ 의 복구율이 각각 0%, 0%, 100% 이므로, $q^{(2)} = cb_{2,4}$ 를 선택함. (같은 방법으로 링크 고장 3,4,5,6,7에 대해 $q^{(i)}$ 을 각각 구하면, $cb_{2,2}$, $cb_{2,4}$, $cb_{2,3}$, $cb_{2,3}$ 임).
- 2-2: $Q=\{cb_{2,2}, cb_{2,3}, cb_{2,4}\}$ 이 됨.

단계 3 (스키마 집합 SQ 생성)

- 3-1: $cb_{2,2}$ 는 링크 1, 3이 고장일 때 복구량이 35Mbps로서 $cb_{2,3}$ 의 35Mbps와 같거나, $cb_{2,4}$ 의 15Mbps에 비해 크므로, $L_{2,2}^{(B)} = \{1, 3\}$ 을 임의로 선택함.
- 3-2: $cb_{2,2}$ 에서 $L_{2,2}^{(B)}$ 를 지나는 WVP와 같은 위치에 있는 인자들로 구성된 스키마 $sb_{2,2} :$ $(* * 0 1 \text{ * * * * *})$ 를 구함.
- 3-1: $cb_{2,3}$ 은 링크 5,6,7이 고장일 때 복구량이 225Mbps로서 $cb_{2,2}$ 와 $cb_{2,4}$ 의 65Mbps와 110Mbps에 비해 크므로, $L_{2,3}^{(B)}=\{5,6,7\}$ 을

선택함.

3-2: $cb_{2,3}$ 에서 $L_{2,3}^{(B)}$ 를 지나는 WVP와 같은 위치에 있는 인자들로 구성된 스키마 $sb_{2,3}$: (0100*11*0*)를 구함.

3-1: $cb_{2,4}$ 는 링크 2,4가 고장일 때 복구량이 50Mbps로서 $cb_{2,2}$ 와 $cb_{2,3}$ 의 20Mbps와 20Mbps에 비해 크므로, $L_{2,4}^{(B)}=(2,4)$ 를 구함.

3-2: $cb_{2,4}$ 에서 $L_{2,4}^{(B)}$ 를 지나는 WVP와 같은 위치에 있는 인자들로 구성된 스키마 $sb_{2,4}$: (****00****0)를 구함.

3-3: $sb_{2,2}$, $sb_{2,3}$, $sb_{2,4}$ 로 구성된 스키마 집합 $SQ = \{ (*01*****), (0100*11*0*), (****00****0) \}$ 임.

단계 4 (Pop_B 에서의 유전연산)

4-1: $cb_{2,2}$ 에 $sb_{2,3}$ 과 $sb_{2,4}$ 를 복사하면 각각 $rf_{2,2}^{2,3} = 160Mbps$ 이고, $rf_{2,2}^{2,4} = 30Mbps$ 임.

4-2: $rf_{2,2}^{2,3} > rf_{2,2}^{2,4}$ 이므로, 기존의 $cb_{2,2}$ 에 스키마 $sb_{2,3}$ 을 복사하여 새로운 $cb_{2,2}$ 을 생산함.
 $cb_{2,2} : (****1**0*1) + sb_{2,3} :$
 (0100*11*0*) \rightarrow $cb_{2,2} : (0100111001)$

4-1: $cb_{2,3}$ 에 $sb_{2,2}$ 와 $sb_{2,4}$ 를 복사하면 각각 $rf_{2,3}^{2,2} = 0Mbps$ 이고, $rf_{2,3}^{2,4} = 30Mbps$ 임.

4-2: $rf_{2,3}^{2,4} > rf_{2,3}^{2,2}$ 이므로, 기존의 $cb_{2,3}$ 에 스키마 $sb_{2,4}$ 를 복사하여 새로운 $cb_{2,3}$ 을 생산함.

$cb_{2,3} : (0100**110*) + sb_{2,4} :$
 (****00****0) \rightarrow $cb_{2,3} : (0100001100)$

4-1: $cb_{2,4}$ 에 $sb_{2,2}$ 와 $sb_{2,3}$ 을 복사하면 각각 $rf_{2,4}^{2,2} = 20Mbps$ 이고, $rf_{2,4}^{2,3} = 115Mbps$ 임.

4-2: $rf_{2,4}^{2,3} > rf_{2,4}^{2,2}$ 이므로, 기존의 $cb_{2,4}$ 에 스키마 $sb_{2,3}$ 을 복사하여 새로운 $cb_{2,4}$ 을 생산함.

$cb_{2,4} : (****0**1*0) + sb_{2,3} :$
 (0100*11*0*) \rightarrow $cb_{2,4} : (0100011100)$

5. 실험 및 비교 분석

5.1 비교 기법

본 절에서는 제안된 공진화 알고리즘(Proposed Coevolutionary Algorithm: PCA)의 성능을 컴퓨터 모의실험을 통해 비교 분석한다. 성능 비교에 사용된 기법은 기존의 3가지 발견적 경로설정 기법(Heuristic Techniques: HT)과 고전적인 유전알고리즘(Conventional GA: CGA)이다.

5.1.1 발견적 경로 설정 기법

하나의 경로를 결정하고자 할 때, 다수개의 대안 경로들 중에서 어떤 대안경로를 선택할 것인가 하는 기준에 따라 흔히 다음과 같은 3가지 발견적 경로 설정 기법이 사용된다[3].

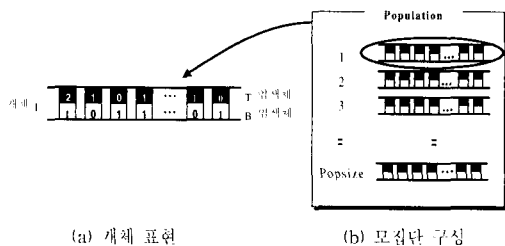
- 1) 최단가능경로설정(Shortest Feasible Path Routing)기법
대안경로들 중에서 경로상의 홉 수가 최소인 경로를 선택한다.
- 2) 최대흐름경로설정(Maximum Flow Path Routing)기법
대안경로들 중에서 경로상의 최소의 링크 여유용량이 최대인 경로를 선택한다.
- 3) 최소부하경로설정(Least Loaded Path Routing)기법
대안경로들 중에서 경로상의 링크 여유용량의 평균이 최대인 경로를 선택한다.

위의 3가지 기법에서 VP의 할당 순서는 대역폭이 큰 순으로 한다. 공진화 알고리즘에서와 같이 각 WVP와 BVP의 대안경로가 먼저 구해진다. 각 기법을 적용하여 WVP 집합을 각각 구한다. 각 WVP를 설정한 후, 각 링크에 남은 여유용량에 대해 다시 각 기법을 적용하여 BVP 집합을 구한다. 따라서, WVP와 BVP의 집합 쌍은 9개가 된다. 그리고 선택된 대안경로의 평가 방법은 3.3절의 방법을 사용한다.

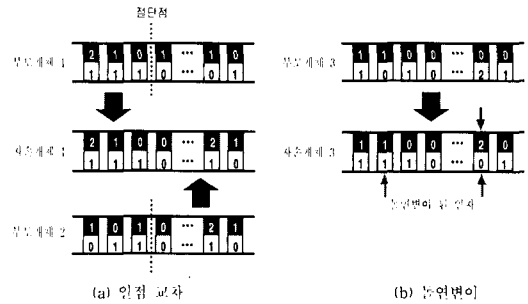
5.1.2 고전적 유전알고리즘

고전적 유전알고리즘은 문제의 잠재해를 표현한 개체들로 모집단을 구성하고, 모집단은 매 세대마다 일정수의 개체를 유지한다. 매 세대에서 각 개체의 적응도를 평가하여 이에 따라 다음 세대에 생존할 개체들을 확률적으로 선별한다. 선별된 개체들 중 일부의 개체들이 임의로 짝을 지어 교차하여 자손을 생산한다. 이때 돌연변이가 일어날 수 있다. 자손은 확률적으로 좋은 부모의 유전형질을 상속 받음으로써 다음 세대의 자손들의 평균 적응도는 이전 세대들보다 더 높아진다고 본다. 종료조건이 만족될 때까지 이러한 진화 과정을 반복한다.

본 연구에서 다루는 문제에 고전적 유전알고리즘을 적용하기 위해 [그림 4] (a)와 같이 WVP 개체(T 염색체)와 BVP 개체(B 염색체)를 결합하여 하나의 개체로 구성하고, (b)와 같이 단일 모집단을 구성하였다. 개체는 인자 위치에 대응하는 VP의 대안경로 번호를 사용하여 표현하였다. 개체 평가는 3.3절에서 제시한 방법을 사용한다. 다음 세대에 생존 시킬 개체선별방법은 모집단으로부터 s개의 비교 개체를 선별하여 적응도가 가장 우수한 개체를 선별하여 다음 세대에 생존 시키는 토너먼트 선별 (tournament selection)방법을 사용하였다. 유전연산은 [그림 5]와 같이 일점(one-point)교차와 돌연변이를 적용하였다. 일점교차에서는 임의로 선택된 절단점을 기준으로 각 부모 개체에 있는 T 염색체와 B염색체의 동일한 부분이 자손 개체에 상속되도록 적용하였다. 돌연변이는 각 인자의 대안경로번호 중에서 임의로 변경하였다.



[그림 4] 고전적 유전알고리즘의 개체 표현과 모집단 구성



[그림 5] 고전적 유전알고리즘의 교차와 돌연변이

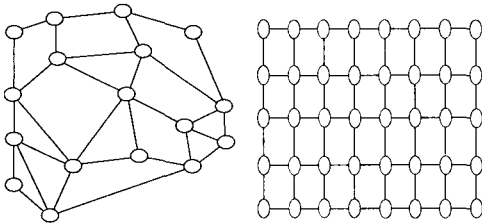
5.2 실험 문제 설정

컴퓨터 모의실험에 사용된 문제는 통신망의 크기(X), 설정하고자 하는 VP 개수(Y)와 복구율의 범위(Z)을 다양하게 조합하여 설정되었으며, X-Y-Z로 나타낸다. 통신망은 [그림 6]과 같이 (노드수, 링크수)가 (17, 30)과 (40, 67)개로 구성된 양방향 통신망을 사용하였으며, 이를 각각 X = 17과 X = 40으로 두었다. 설정해야 할 VP 개수는 X = 17인 통신망 문제에서는 Y = 120, 240, 360개로 두었고, X = 40인 통신망 문제에서는 Y = 240, 300, 420개로 두었다. 또한, 링크 용량을 달리하여 다양한 복구율이 발생하도록 문제를 설정하였다. 제시된 발견적 기법(HT)에 의해 WVP가 100% 설정되고, 복구율이 80% 이상이면 Z = H, 60% 이상 80% 미만이면 Z = M, 60% 미만이면 Z = L로 두었다. 그리고, HT에 의해 WVP가 100% 설정되지 못한 경우에는 Z = U로 두었다. 예로 40-420-M으로 표현된 실험 문제는 40개의 노드로 이루어진 통신망에 420개의 WVP와 420개의 BVP를 설정하고자 하는 문제로서, HT에 의해 WVP가 100% 설정되었으며, 복구율은 60%이상 80% 미만임을 의미한다.

실험에 사용된 VP의 대역폭은 2~40(Mbps)의 일양 분포(uniform distribution)를 따르도록 생성하였다. CGA와 PCA는 실험 문제마다 10회 반복 실험되었으며, 1회 반복에 소요되는 계산 시간(단위: 초)은 설정해야 할 WVP의 수(Y)와 동일하게 두었다. 실험은 Intel Pentium Processor 166MHz

를 장착한 IBM PC 호환기종에서 실시되었다.

고전적 유전알고리즘(CGA)에 사용된 유전 파라미터 값은 예비실험을 통해 모집단의 크기(pop-size)는 100, 선별을 위한 비교 개수(s)는 2로 두었다. 그리고, 교차 확률은 1.0, 돌연변이 확률은 0.05로 두었다. 제안된 공진화 알고리즘에 사용된 모집단의 크기(가로×세로)는 100(10×10)으로 두었고, 이웃의 크기(가로×세로)는 임의로 선택된 위치에 있는 개체를 중심으로 주변의 개체수 9(3×3)로 두었다.



(a) (17, 30) 통신망 (b) (40, 67) 통신망
[그림 6] 실험에 사용된 양방향 통신망

5.3 성능 비교 분석

비교 기법들간의 해 탐색 성능을 복구율을 조사하여 비교 분석하였다. <표 2>와 <표 3>은 HT에 의해 WVP가 100% 설정된 경우와 그렇지 않은 경우의 실험 문제에 비교 기법들을 적용하여 구한 복구율을 각각 나타낸다. <표 2>의 2열은 각 실험 문제마다 설정해야 할 WVP의 대역폭 합을 나타낸다. 3열은 각 실험 문제에 대해 HT를 적용하여 구한 9개의 해 중에서 가장 우수한 해를 나타낸다. 각 실험 문제에 대해 CGA(또는 PCA)를 10회 반복 적용하여 구한 해의 평균값과 표준편차를 각각 4열(또는 6열)과 5열(또는 7열)에 나타냈다. 8열은 HT와 CGA중에서 더 높은 복구율, R_{hc} 에 대한 PCA로 구한 복구율, R_{pca} 의 개선율, $(R_{pca} - R_{hc}) \times 100/R_{hc}$ 을 나타낸다.

<표 3>의 3, 4, 6열의 결과값은 각 실험 문제에 3가지 비교 기법을 적용하여 구한 WVP의 설정률

<표 2> 운용가상경로의 복구율 비교

실험문제	VP 대역폭 합 (Mbps)	HT			CGA		PCA		
		복구율(%)	복구율(%)	표준편차	복구율(%)	표준편차	개선율(%)		
17-120-H	2,612	86.8 ^T	83.1	1.90	92.0*	1.59	6.0		
17-240-H	4,752	86.2 ^T	76.5	1.87	90.1*	1.18	4.5		
17-360-H	7,336	84.5 ^T	75.7	1.76	93.9*	1.45	11.1		
40-240-H	5,010	86.0 ^T	80.5	2.38	95.9*	1.22	11.5		
40-300-H	5,931	83.3 ^T	81.7	1.49	89.1*	0.76	7.0		
40-420-H	8,506	88.6 ^T	82.4	1.81	92.5*	0.46	4.4		
17-120-M	2,384	60.8	68.2 ^T	2.77	79.0*	1.33	15.8		
17-240-M	5,186	63.3 ^T	60.3	1.60	82.7*	1.54	19.4		
17-360-M	7,407	68.1	53.9	3.02	78.9*	2.47	15.9		
40-240-M	5,117	64.6 ^T	50.0	6.55	71.6*	2.34	10.8		
40-300-M	6,230	70.2 ^T	68.9	1.34	82.2*	1.03	17.1		
40-420-M	9,112	68.2 ^T	61.3	2.11	75.9*	0.99	11.3		
17-120-L	2,542	44.3	53.1 ^T	3.65	69.1*	1.43	30.1		
17-240-L	5,089	51.9 ^T	44.5	3.30	60.7*	2.20	17.0		
17-360-L	7,654	58.3 ^T	34.0	4.29	67.5*	4.33	15.8		
40-240-L	4,981	55.1 ^T	53.9	3.07	79.4*	1.93	44.1		
40-300-L	6,636	59.1 ^T	56.1	2.09	68.1*	0.99	15.2		
40-420-L	9,030	53.4 ^T	39.2	3.31	62.3*	0.82	16.7		

여기서, *는 각 실험 문제에 대해 3가지 비교 기법을 적용하여 구한 해 중 최선해를 나타내고, ^T는 차선해를 나타낸다.

<표 3> 운용가상경로의 설정률과 복구율 비교

실험문제	VP대역폭 합 (Mbps)	HT		CGA		PCA	
		설정률, 복구율 (%)	설정률, 복구율 (%)	표준편차	설정률, 복구율 (%)	표준편차	개선율 (%)
17-120-U	2,380	98.9, 41.0	100.0, 41.0	0.00, 6.40	100.0, 59.8*	0.00, 1.91	1.2, 46.1
	2,627	98.4, 57.8	100.0, 43.8	0.00, 3.41	100.0, 61.3*	0.00, 2.19	1.7, 6.1
17-240-U	4,829	99.5, 52.3	100.0, 39.9	0.00, 4.60	100.0, 63.2*	0.00, 1.28	0.5, 20.8
	5,281	99.1, 60.1	100.0, 34.4	0.00, 7.55	100.0, 65.9*	0.00, 1.30	1.0, 9.8
17-360-U	7,334	99.8, 61.2	100.0, 34.0	0.00, 7.49	100.0, 72.5*	0.00, 2.00	0.2, 18.5
	7,592	99.3, 45.5	99.8, 18.9	0.16, 3.24	100.0, 54.0*	0.00, 7.14	0.7, 18.7
40-240-U	5,082	99.7, 50.1	99.6, 23.7	0.16, 2.38	100.0, 62.8*	0.00, 5.86	0.3, 25.3
	5,318	97.7, 44.7	99.0, 26.0	0.34, 3.93	99.1, 48.6*	0.29, 4.72	1.4, 8.7
40-300-U	6,114	99.5, 56.4	99.8, 25.9	0.17, 3.11	100.0, 68.4*	0.00, 3.91	0.5, 21.3
	6,771	99.4, 44.6	99.9, 29.8	0.05, 2.60	100.0, 51.1*	0.00, 1.59	0.6, 14.7
40-420-U	8,925	99.8, 46.6	99.9, 40.8	0.04, 5.07	100.0, 67.2*	0.00, 1.34	0.2, 44.3
	9,071	99.1, 59.0	99.9, 40.9	0.02, 3.26	100.0, 60.6*	0.00, 1.58	0.9, 2.3

여기서, *는 각 실험 문제에 대해 3가지 비교 기법을 적용하여 구한 해 중 설정률과 복구율이 모두 가장 우수한 해를 나타낸다.

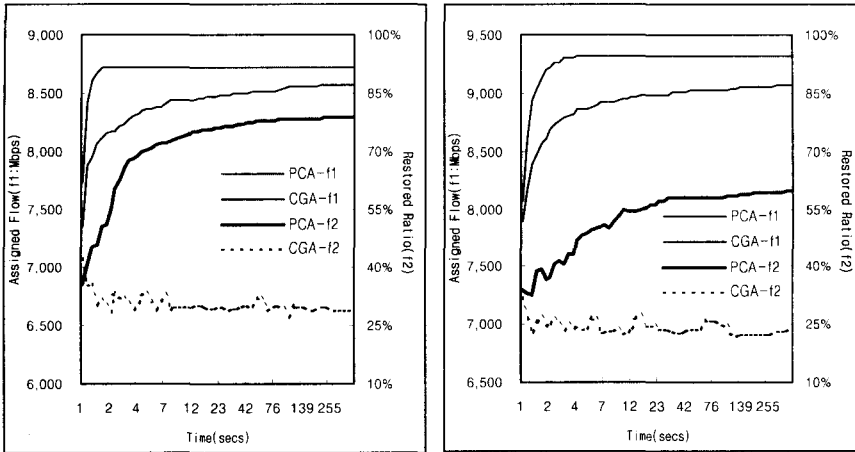
과 복구율을 나타낸 것이다. 여기서 설정률은 설정해야 할 WVP의 대역폭 총 합에 대한 설정된 WVP의 대역폭 총 합의 비율을 나타낸다. 8열은 <표 2>에서와 같은 방법으로 HT에 대한 PCA의 개선율을 나타낸다.

PCA는 비교 기법들 중 가장 우수함을 <표 2>로부터 알 수 있다. 특히, X-Y-H, X-Y-M, X-Y-L 실험 문제에서 각각 약 4~12%, 10~20%, 15~45%의 개선을 보임으로써 제안한 알고리즘은 망의 여유용량이 충분하지 못할 때 더 성능이 우수함을 알 수 있다. 또한, PCA에서 해의 표준편차는 CGA에서 보다 더 낮게 나타남으로써 알고리즘이 보다 안정적임을 알 수 있다.

<표 3>에서 CGA는 40-240-U를 제외한 모든 실험 문제에서 HT에 비해 설정률은 높은 반면, 복구율은 항상 낮게 나타났다. 그러나 PCA는 모든 실험 문제에서 설정률 뿐만 아니라 복구율도 항상 높게 나타났다. 특히, 설정률의 표준편차는 40-240-U의 두 번째 실험 문제를 제외한 모든 실험 문제에서 표준편차가 0.00으로 나타났다. 복구율의 표준편차는 CGA에 비해 대체적으로 안정적이나,

<표 2>의 PCA에서 보다 약간 높게 나타났다. 이는 직관적으로 <표 3>에 있는 실험 문제는 <표 2>의 실험 문제보다 복잡도가 높기 때문(WVP와 BVP의 설정을 동시에 최대화 시켜야 하기 때문)으로 판단된다. 또한, HT에 대한 PCA의 설정률과 복구율의 개선율 증가는 상반되게 나타난다. 즉, 설정률이 소폭 증가하면, 복구율의 증가는 상당히 감소한다. 이는 설정률이 높아지면, 일반적으로 복구해야 할 대역폭이 증가할 뿐만 아니라, 망 구성 요소의 여유 자원이 감소하여 복구가 더욱 어려워지기 때문인 것으로 해석된다.

CGA와 PCA에서 해의 탐색과정을 알아보기 위해 두 문제 40-420-M과 40-420-U를 실험하였다. 실험 결과는 [그림 7] (a), (b)와 같다. [그림 7]에서 계산시간이 경과됨에 따라, CGA는 WVP의 설정량(CGA-f1)은 증가시키나, 복구율(CGA-f2)은 증가시키지 못하였다. 그러나 PCA는 WVP의 설정량(PCA-f1)과 복구율(PCA-f2)을 동시에 증가시켰다. 또한, PCA는 안정된 상태에 도달하는데 약 20초 정도 소요되어, 짧은 시간 내에 우수한 해를 찾음을 알 수 있다.



(a) 40-420-M 실험 문제의 경우

(b) 40-420-U 실험 문제의 경우

[그림 7] 제안된 공진화 알고리즘의 해 탐색 과정

6. 토의 및 결론

본 연구에서는 ATM망에서 WVP와 BVP의 동시 설정을 위한 공진화 알고리즘을 개발하였다. 이를 위하여 다루는 문제에 적절한 개체 표현과 평가 방법, 그리고 모집단 구성과 유전연산자를 제안하였다. 특히, 유전연산은 이웃에 있는 개체들에서 좋은 스키마를 추출하여 진화 시킴으로써 해 공간에서 좋은 해의 이용과 다양한 탐색을 가능하게 하였고, 모집단 간에는 유용한 정보에 의해 상호작용함으로써 WVP의 설정과 복구가 동시에 향상될 수 있도록 하였다.

제안한 알고리즘의 성능 분석을 위하여 다양한 실험 문제를 생성하여 기존의 발전적 기법과 고전적 유전알고리즘과 비교 분석하였다. 제안한 공진화 알고리즘은 WVP의 설정과 복구 측면 모두에서 비교 기법들 보다 안정적으로 좋은 해를 찾을 수 있었다. 특히, WVP의 복구가 어려운 즉, 복구율이 낮은 문제에서 성능이 더욱 우수하였다. 이로부터 제안한 알고리즘은 망의 여유용량이 충분치 못한 경우나 망의 전송 능력에 비해 서비스의 요청이 많은 경우, 또는 고장 규모가 대형인 경우의 경

로 설정에 더욱 효과적일 것으로 기대된다.

제안한 공진화 알고리즘은 ATM망의 경로설정에서 나타나는 여러 현실적인 제약이나 다른 척도를 갖는 경우에도 약간의 변형으로 적용이 가능하다는 장점을 갖는다. 경로설정에서 몇 가지 부가적인 고려 사항들과 그에 따른 적용 방법을 간략히 설명하면 다음과 같다.

첫째, WVP가 경유하는 망 구성 요소의 고장마다 즉, 고장에 종속적인 BVP를 설정하고자 한다면, 망 구성 요소의 고장마다 고장난 구성 요소를 경유하지 않도록 ABVP 집합, $BP(u, k, h)$ 을 구성하여 제안한 알고리즘을 반복 적용한다. 이때, 고장난 망 구성 요소를 경유하는 즉, 고장난 WVP에 대응하는 인자들만으로 개체를 표현하면 된다.

둘째, 망 구성 요소마다 서로 다른 고장 확률을 반영하고자 한다면, 고장 확률을 3.3절의 개체 평가에서 고려하여 복구율을 산정하여 이를 적용도에 반영하면 된다.

셋째, VP의 설정과 복구의 우선 순위를 고려하는 경우에는, 3.3절의 개체 평가에서 목록을 만들 때 중요도에 따라 VP를 나열하여 평가하면 된다. 이 방법은 목록에 나열된 순서대로 VP를 평가하기

때문에 중요도가 높은 VP가 낮은 VP에 비해 우선적으로 설정 또는 복구되는 결과를 가져온다.

참 고 문 헌

- [1] 김여근, 윤복식, 이상복, 「메타 휴리스틱」, 영지문화사, 1997.
- [2] Koza, J. R., *Genetic Programming*, The MIT Press, 1992.
- [3] Ahn, S., R. P. Tsang, S.-R. Tong, and David H. C. Du, "Virtual Path Layout Design on ATM Networks," *IEEE INFOCOM'94*(1994), pp.192-200.
- [4] Anderson, J., B. T. Doshi, S. Dravida, and P. Harshavardhana, "Fast Restoration of ATM Networks," *IEEE J-SAC*, Vol.12(1994), pp.128-138.
- [5] Davidor, Y., "A Naturally Occurring Niche & Species Phenomenon: The Model and First Results," *4th International Conference on Genetic Algorithms*(1992), pp.257-263.
- [6] Elbaum, R. and M. Sidi, "Topological Design of Local-Area Networks Using Genetic Algorithms," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, Vol.4, No.5, October (1996), pp.766-778.
- [7] Gersht, A. and A. Shulman, "Architecture for Restorable Call Allocation and Fast VP Restoration in Mesh ATM Networks," *IEEE ICC'97*(1997), pp.1158-1163.
- [8] Grover, W. D., "The Selfhealing Network", *IEEE GLOBECOM'87*(1987), pp.1090-1095.
- [9] Handa, H., N. Baba, O. Katai, T. Sawaragi, and T. Horiuchi, "Genetic Algorithm involving Coevolution Mechanism to Search for Effective Genetic Information," *International Conference on Evolutionary Computation*(1997), pp.709-714.
- [10] Kawamura, R., K. Sato and I. Tokizawa, "Self-Healing ATM Networks Based on Virtual Path Concept," *IEEE J-SAC*, Vol.12 (1994), pp.120-127.
- [11] Koh, J. S., Y. K. Kim, J. S. Kwak, and I. S. Kim, "A Genetic Algorithm for Backup Virtual Path Routing in Restoration of ATM Networks," *Proceedings of the 7th International Symposium on Network Planning*(1996), pp.639-644.
- [12] Komine, H., T. Chujo, T. Ogura, K. Miyazaki, and T. Soejima, "A Distributed Restoration Algorithm for Multiple-Link and Node Failures of Transport Networks," *IEEE GLOBECOM'90*(1990), pp.459-463.
- [13] Pai, D. J. and H. L. Owen, "An Algorithm for Bandwidth Management with Survivability Constraints in ATM Networks," *IEEE ICC'97*(1997), pp.261-266.
- [14] Ryu, B. H., O. Hiroyuki, M. Murata, and H. Miyahara, "Design Algorithm for Virtual Path Based ATM Networks," *IEICE Transactions on Communication*, Vol.E79-B, No.2(1996), pp.97-107.
- [15] Shimamoto, N., A. Hiramatsu, and K. Yamasaki, "A Dynamic Routing Control Based on a Genetic Algorithm," *IEEE CNN*(1993), pp.1123-1128.
- [16] Tanterdtid, S., W. Steanputtanagul, and W. Benjapolakul, "Optimizing ATM Network Configuration based on Virtual Path Concept Using Genetic Algorithm," *IEEE PACRIM '97*(1997), pp.392-397.
- [17] Wu, C.-S., S. Lee, and K.-T. Wu, "Study of Working and Backup Path Routing Policies in Self-healing ATM Networks," *Proceedings of 1995 International Symposium on Communications*(1995), pp.807-814.