신뢰성있는 네트워크 확장을 위한 위상설계

염 창 선*·이 한 진**
* 부경대학교 경영학부, yumcs@pknu.ac.kr
** 부경대학교 대학원 경영학과, exit2000@hanmail.net

Topological Design of Reliable Network Expansion

Chang Sun Yum · Han Jin Lee
Division of Business Administration, Pukyong National University, Busan, 608-737

Abstract

The existing network can be expanded with addition of new nodes and multiple choices of link type for each possible link. In this paper, the design problem of network expansion is defined as finding the network topology minimizing cost subject to reliability constraint. To efficiently solve the problem, an genetic algorithm approach is suggested.

Keywords: Network Expansion, Economic Design, Genetic Algorithm

Ⅰ. 서 론

정보기술 중 컴퓨터 네트워킹은 기업 구성원들 간에 고가의 하드웨어와 소프트웨어 자원을 공유할 수 있게 할 뿐만 아니라 물리적으로 떨어져 있는 자원들 간을 연결함으로써 보다 적은 비용으로 다양한 정보에 접근할 수 있도록 해 준다. 컴퓨터 네트워킹이 기업의 정보 공유를 위한 중요한 역할을 하게 됨에 따라 네트워크의 단절은 기업 활동에 직접적인 영향을 미치게 되었다. 이에 따라 신뢰성있는 컴퓨터 네트워크 설계의 필요성이 제기되어 왔다. 신뢰성있는 컴퓨터 네트워크 설계는 NP-hard 문제에 해당된다(Wood, 1986; Cancela와 Khadiri, 1995).

신뢰성있는 네트워크 설계에 관한 기존 연구를 살펴보면 다음과 같다. Jan 등(1993)은 분해법(decomposition)을 이용하여 네트워크 신뢰도를 제약조건으로 하고 비용을 최소화하는 경제적 네트워크 설계 방법을 제시하였다. 그리고 Deeter와 Smith(1998)는 유전자 알고리즘(GA: Genetic Algorithm)을 이용하여 신뢰도를 제약조건으로 하고 비용을 최소화하는 경제적 네트워크 설계 방법을 제시하였다. 이들과는 달리, Kumar 등(1995)은 기존의 네트워크에 특정 노드를 부가하는 경제적 네트워크 확장 설계에 관해 연구하였다. 그리고 Shao와 Zhao(1998)는 신뢰도 제약조건 하에서 기존 네트워크에 여러 후보 노드 중 한 개의 노드를 선택하여 부가하는 경제적 확장 설계 방법을 제시하였다.

기존의 네트워크 확장 설계 연구는 기존의 네트워크에 새로운 노드만을 부가 데 그치고 있다. 그러나 본 연구는 기존 네트워크에 새 노드 부가 이외에 여러 유형의 링크 수준 및 기존 링크의 교체까지를 고려하는 보다 현실적인 경제적 네트워크 확장 설계 방법을 제시하고자 한다. 이 설계 방법은 신뢰도를 제약조건으로 하고 비용을 최소화하는 네트워크 확장 설계 방법으로 효율적인 해의 탐색을 위해 GA를 이용한다.

Ⅱ. 네트워크 확장 설계 문제의 표현

2.1 기본 가정 및 표기 형식

네트워크 확장 설계를 위한 가정은 다음과 같다.
- 각 노드의 위치는 주어져 있다.
- 노드들은 완전히 신뢰할 수 있다.
- 각 링크는 무방향적(bi-directional)이다.
- 중복된 링크는 존재하지 않는다.
- 링크의 상태는 고장이거나 비고장 상태로 한정한다.
- 각 링크의 실패는 독립적이다.

네트워크 확장 설계와 관련된 표기는 다음과 같다.
- $\boldsymbol{E}$: 네트워크 설계에 있어 연결된 링크들의

집합

- $\{i, j\}$: 노드 i와 j를 연결하는 링크
- $x_{i,j}$($\in \{0,1,2,\ldots,k-1\}$) : $\{i, j\}$의 링크 유형, 여기서 k는 링크 유형의 가지 수
- $\boldsymbol{x}$ (= $\{x_{1,2}, x_{1,3}, \ldots, x_{n-1,n}\}$) : 네트워크 설계 구조
- $C(\boldsymbol{x})$: 네트워크 설계의 총 비용
- $R(\boldsymbol{x})$: 네트워크 설계의 신뢰도
- R_0 : 요구된 최소의 네트워크 신뢰도

2.2 네트워크 확장 문제의 모형

네트워크 확장 설계 문제는 다음과 같이 모형화 될 수 있다.

목적함수 :

$$\text{Minimize } C(\boldsymbol{x}) = \sum_{\{i,j\} \in E} c_{ij}$$

제약조건 : $R(\boldsymbol{x}) \geq R_0$

여기서 c_{ij}는 링크 $\{i, j\}$의 비용을 의미하며, $c_{ij} = a_{ij} \cdot d_{ij}$로 표현될 수 있다. a_{ij}는 단위거리 당 링크 $\{i, j\}$의 비용을, d_{ij}는 링크 $\{i, j\}$의 거리를 의미한다.

기존 네트워크에 설치된 링크를 더 나은 수준으로 교체하는 경우에는 새 링크 설치비용 이외에 추가적인 교체비용이 소요되므로 $c_{ij} = a_{ij} \cdot d_{ij} \times (1 + r_e)$로 표현될 수 있다. 여기서 r_e는 교체비용율을 의미한다.

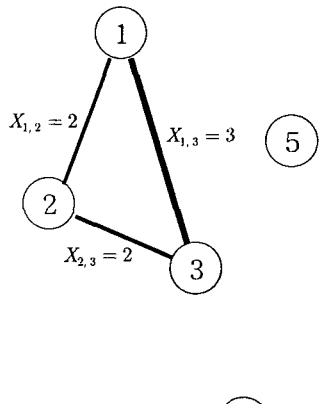
2.3 네트워크 설계 구조의 염색체 표현

<그림 1>은 하나의 네트워크 확장 설계 문제를 보여주고 있다. 3개의 노드가 링크 $x_{1,2}$, $x_{1,3}$, $x_{2,3}$으로 연결되어 있는 기존 네트워크에 새로운 노드 4와 5를 확장하는 문제이다. 이 문제에서 각 링크를 위해 고려하는 선택 가능한 링크 유형의 가지 수(k)는 4이다. <표 1>은 <그림 1>의 네트워크 확장 설계 구조의 노드간 링크의 유형을 보여 주고 있다.

<그림 1>의 확장 네트워크 설계 구조는 다음과 같은 염색체(chromosome)로 표현될 수 있다.

염색체 : {[2] [3] 0 0 [2] 0 0 0 0 0}

이는 <표 1>의 우 상향 삼각형 모양의 각 행을 1줄로 나열한 것으로, 네트워크 설계의 링크 유형이 염색체의 구성요소인 형질(allele)로 표현되었다. 여기서, 사각형으로 표시된 형질은 기존 네트워크의 링크를 의미하며 제약된 형질(constrained allele)로 명명된다.



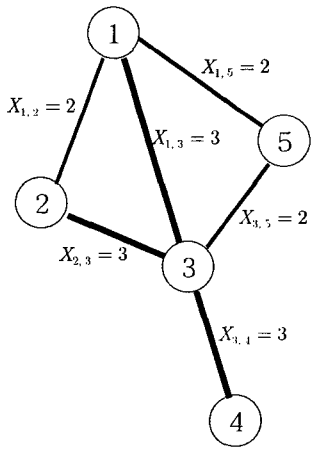
<그림 1> 네트워크 확장 설계 문제

<표 1> 노드간 링크 유형

	1	2	3	4	5
1	-	2	3	0	0
2		-	2	0	0
3			-	0	0
4				-	0
5					-

주) 링크 유형은 4가지로 0, 1, 2, 3이다. 그리고 음영은 기존 네트워크의 링크 유형을 나타낸다.

<그림 2>와 <표 2>는 이 탐색 대상 해 중 하나인 후보 해와 이의 노드간 링크 유형을 보여주고 있다.



<그림 2> 후보 해

<표 2> 노드간 링크 유형

	1	2	3	4	5
1	-	2	3	0	2
2		-	3	0	0
3			-	3	2
4				-	0
5					-

주) 링크 유형은 4가지로 0, 1, 2, 3이다. 그리고 음영은 기존 네트워크의 링크 유형을 나타낸다.

이 후보 해의 염색체 표현은 다음과 같다.

염색체 : {[2] [3] 0 2 [3] 0 0 3 2 0}

III. 신뢰성있는 네트워크 확장 설계

3.1 신뢰성있는 네트워크 확장 설계를 위한 절차

GA를 이용한 경제적 네트워크 확장 설계의 단계별 주요 절차는 아래와 같다.

(1) 매개변수(parameter) 초기화
- g : 세대(generation) 수
- g_{max} : 최대 세대 수
- s : 개체집단(population)의 크기
- $m\%$: 돌연변이 염색체의 비율
- r_m : 돌연변이 형질의 비율

(2) 초기 세대의 개체집단 생성
(g = 1)
(a) 초기 세대의 개체집단을 무작위로 생성한다.
(b) 초기 세대의 개체집단을 신뢰도 계산함수로 보낸다.
(c) 초기 세대의 개체집단을 비용 계산함수로 보낸다.
(d) 초기 세대의 가장 우수한(best) 해를 검사한다.

(3) 반복적인 교배 및 돌연변이 연산
(a) 교배 및 돌연변이
- 순위기반 선택에 따라 현재 세대의 개체집단으로부터 서로 다른 두 부모가 선택된다.
- 균등교배를 통해 자손이 생성된다.
- 생성된 자손을 돌연변이 비율에 따라 돌연변이 연산을 한다.
- 자손이 충분히 생성되었을 때, 부모들은 자손에 의해 대체된다.

(b) 새로운 개체집단을 신뢰도 계산함수로 보낸다.
(c) 새로운 개체집단을 비용 계산함수로 보낸다.
(d) 새로운 가장 우수한 해를 검사한다.
(e) 최대 세대 수($g = g_{max}$)까지 반복한다.

3.2 초기 세대의 개체집단 생성

초기 세대의 개체집단 구성을 위해 각 형질에 대한 링크 유형을 무작위로 결정한다. 단, 기존 네트워크 링크는 더 나은 수준으로의 교체만이 가능하므로, 제약된 형질인 경우는 기존 링크 수준 이상의 유형들 중에서 무작위로 결정한다.

3.3 교배 및 돌연변이 연산

교배 연산을 위해 두 개의 염색체를 순위기반 선택(rank based quadratic procedure)을 적용하여 선택한다(Tate와 Smith, 1995). 선택된 두 부모 염색체를 대상으로 균등교배를 실시한다.

돌연변이 연산은 먼저 자손 염색체들 중에서 돌연변이 염색체의 비율($m\%$)에 따라 돌연변이 대상 염색체를 무작위로 선택한다. 그리고 돌연변이 형질의 비율(r_m)에 따라 형질을 무작위로 선택하고, 역시 선택한 형질에 대해 무작위로 링크 유형을 결정한다. 단, 제약된 형질인 경우는 기존 링크 수준 이상의 링크 유형들 중에서 무작위로 결정한다. 이는 기존 링크의 교체는 더 나은 수준으로 이루어져야 한다는 것을 의미한다.

3.4 네트워크 신뢰도 계산

본 연구에서는 네트워크 신뢰도 계산을 위해 다음과 같은 알고리즘을 사용한다(Cancela와 El Khadiri, 1995).

(1) 매개변수(parameter) 초기화
- $\boldsymbol{R(x)}$ = 0
- $\boldsymbol{r}$: 네트워크 상태 인스턴스의 신뢰도

(2) 네트워크 상태(network state)의 인스턴스(instance) 생성
(a) n개의 노드로 구성된 네트워크 설계 $\boldsymbol{x}$에 대해 최소한 $n-1$개 이상의 비고장 링크를 포함하는 네트워크 상태 인스턴스들을 생성한다.

(b) 생성한 모든 네트워크 상태 인스턴스를 스택(stack)에 담는다.

(3) 비고장 링크 기반의 신장트리(spanning tree) 검사

(a) 스택이 비어있으면 종료한다.

(b) 스택에서 맨 위의 네트워크 상태 인스턴스를 꺼낸다.

(c) 네트워크 상태 인스턴스가 비고장 링크들만으로 신장트리를 형성하는 지를 검사한다.

- 신장트리를 형성하지 않으면, (3)(a)로 간다.
- 신장트리를 형성하면, (4)로 간다.

(4) 네트워크 신뢰도 계산

(a) 네트워크 상태 인스턴스에 대한 신뢰도(r)를 계산한다.

- 각 링크의 유형에 따른 신뢰도를 확인한다.
- 고장 상태인 링크는 1 - 신뢰도를 신뢰도로 사용한다.
- 모든 링크의 신뢰도를 곱한다.

(b) 네트워크 신뢰도 $R(x) = R(x) + r$

(c) (3)(a)로 간다.

Ⅳ. 성능 실험

이 장에서는 네트워크 확장 문제를 통해, 본 연구에서 제시하는 GA를 이용한 설계 방법의 성능을 실험한다. 실험은 PentiumIV(1.8GHz)와 512MB RAM으로 구성된 PC 환경에서 이루어졌다.

문제는 5개의 노드에 새로운 3개의 노드를 추가하는 경우이다. 문제를 위해 사용된 각 링크 유형의 속성은 <표 3>과 같고, 기존 링크 교체비용율(r_e)은 0.2로 한다.

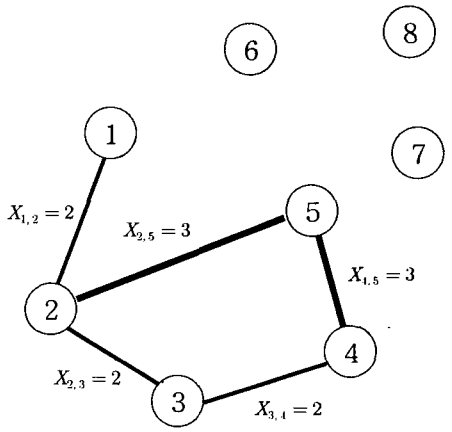
<표 3> 링크 유형의 속성

링크 유형	신뢰도	단위거리 당 비용($)
0(비연결)	0	0
1	0.7	8
2	0.8	10
3	0.9	14

신뢰도 제약조건(R_0)을 0.900으로 하는 문제에 대한 네트워크 확장 설계 구조가 <그림 3>에 표현되어 있다. 그리고 노드간 링크 유형 및 거리가 각각 <표 4>과 <표 5>에 나타나 있다.

먼저 GA를 이용한 네트워크 확장 설계를 수행하였다. 초기 탐색 실험을 통해 초기화 값(g_{max} = 1,500, s = 60, $m\%$ = 25, r_m = 0.25)을 얻은 후, 3.1절에 제시한 설계 절차에 따라 실험을 수행하였다. 그 결과 <그림 4>에 나타나 있는 것과 같은 설계 구조를 갖는 비용이 4,208$이고 네트워크 신뢰도가 0.904인 가장 우수한 해 {203000320300020300300031003}을 찾았다.

Greedy 탐색 방법(Deeter와 Smith, 1998)을 사용하여 GA를 이용한 설계 방법과의 성능을 비교코자 한다.



<그림 3> 네트워크 확장 설계를 위한 문제(R_0=0.900)

<표 4> 노드간 링크 유형

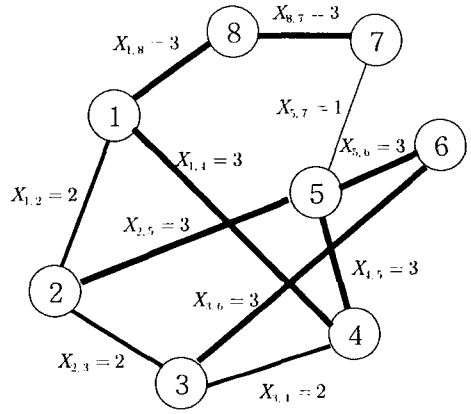
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	-	2	0	0	0	0	0	0
2		-	2	0	3	0	0	0
3			-	2	0	0	0	0
4				-	3	0	0	0
5					-	0	0	0
6						-	0	0
7							-	0
8								-

주) 링크 유형은 4가지로 0, 1, 2, 3이다. 음영은 기존 네트워크의 링크 유형을 나타낸다.

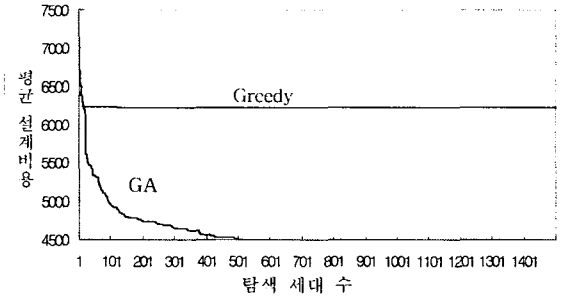
GA를 이용한 설계 방법과 Greedy 탐색 방법 각각에 대해 10개의 seed를 사용하여, 탐색 세대수의 증가에 따른 평균 설계비용의 추이를 살펴보았다. 그 결과가 <그림 5>에 나타나 있다.

<표 5> 노드간 거리 (단위: m)

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	-	47	41	24	48	54	33	34
2		-	20	28	39	31	65	68
3			-	34	19	15	49	53
4				-	50	51	54	56
5					-	13	41	45
6						-	54	58
7							-	30
8								-



<그림 4> 가장 우수한 해(4,208$)



<그림 5> Greedy 탐색 방법과 GA를 이용한 설계 방법의 성능 비교

GA를 이용한 설계 방법은 탐색 세대 수가 증가함에 따라 평균 설계비용이 급격히 떨어져 약 500세대 수에서 4,500$로 수렴하는 반면에, greedy 탐색 방법은 초기 해에서 1,500세대 수가 넘어 갈 때까지 단 2번의 설계비용 감소가 이루어 졌다. 이 결과는 GA를 이용한 설계 방법이 greedy 탐색 방법 보다 훨씬 효율적인 설계 방법이라는 것을 보여 주고 있다.

V. 결 론

기존 네트워크의 확장을 고려하는 많은 기업들은 새로운 네트워크가 신뢰성 있게 설계되길 원한다.

본 연구에서는 이러한 기업의 요구에 맞추어, 새 노드 부가 및 여러 유형의 링크 수준을 고려하는 네트워크 확장 설계 방법을 제시하였다. 이 설계 방법은 효율적인 해의 탐색을 위해 유전자 알고리즘을 이용한다. 네트워크 확장 설계 문제를 통해, 본 연구에서 제시한 네트워크 확장 설계 방법을 greedy 탐색 방법과 비교함으로써 성능의 우수성을 입증하였다.

참고문헌

Cancela, H. and El Khadiri, M., "A Recursive Variance-Reduction Algorithm for Estimating Communication-Network Reliability", IEEE Transactions On Reliability. Vol. 44, No. 4, 1995, pp. 595-602.

Deeter, D. L., and Smith, A. E, "Economic Design of Reliable Networks", IIE Transactions, Vol. 30, 1998, pp. 1161-1174.

Jan, R. H., Hwang, F. H., and Cheng, S. T., "Topological Optimization of a Communication Network Subject to a Reliability Constraint", IEEE Transactions of Reliability, Vol. 42, No. 1, 1993, pp. 63-70.

Kumar, A., Pathak, P. M., and Gupta, Y. P., "Genetic-Algorithm-Based Reliability Optimization for Computer Network Expansion", Vol. 44, No. 1, 1995, pp. 63-72

Shao, F. M., and Zhao, L. C., "Topological Optimization of Computer Network Expansion With Reliability Constraint", Computers Math. Applic., Vol. 35, No. 11, 1998, pp 17-26

Wood, R. K., "Factoring Algorithms for Computing K-Terminal Network Reliability", IEEE Transactions On Reliability. Vol. 35, No. 3, 1986, pp. 269-278.