

# 평균패킷지연시간과 노드연결성이 제약된 네트워크 설계를 위한 Scatter Search 알고리즘

이한진 · 염창선<sup>†</sup>

부경대학교 경영학부

## A Scatter Search Algorithm for Network Design with Mean Packet Delay and Node Connectivity Constraints

Han-Jin Lee · Chang-Sun Yum<sup>†</sup>

Division of Business Administration, Pukyong National University

This paper considers a topological optimization of a network design with mean packet delay and node connectivity constraints. The objective is to find the topological layout of links, at minimal cost. This Problem is known to be NP-hard. To efficiently solve the problem, a scatter search algorithm is proposed. An illustrative example is used to explain and test the proposal approach. Experimental results show evidence that the proposal approach performs more efficiently for finding a good solution or near optimal solution in comparison with a genetic approach.

**Keywords :** Network Design, Mean Packet Delay, Node Connectivity, Scatter Search Algorithm, Genetic Algorithm

### 1. 서론

기업은 경쟁력 향상을 위해 정보기술을 이용하고 있다. 정보기술 중 네트워크 시스템은 기업 구성원, 공급자 및 고객 간에 신속한 의사소통을 가능하게 한다. 그리고 기업 구성원들 간에 고가의 하드웨어와 소프트웨어 자원을 공유할 수 있게 한다. 이와 같이 네트워크 시스템이 기업의 자원 및 신속한 정보 공유를 위한 중요한 역할을 하게 됨에 따라, 네트워크 속도 지연과 회로 단절은 기업 활동에 직접적인 영향을 미치게 되었다. 그 결과 기업은 안정적이고 신속한 업무처리를 위해 속도 지연과 회로 단절이 없는 네트워크를 가능하면 저렴하게 설치하여 운용하길 원하게 되었다. 이에 따라 네트워크 설치비용과 더불어 네트워크 평균패킷

지연시간(mean packet delay)과 네트워크 신뢰성(reliability)은 네트워크 설계를 위한 중요한 요소로 다루어져 왔다(오동헌, 염창선[2]). 이러한 네트워크의 중요한 요소를 고려한 네트워크 설계는 NP-hard 문제에 해당되어 문제 해결을 위해 주로 휴리스틱 알고리즘이 이용된다(Wood[18]; Cancela, Khadiri[14]; Dengiz et al.[15]).

네트워크 설계에 대한 기존 연구는 제약조건 측면에서 크게 네트워크 신뢰성 관련 연구와 네트워크 평균패킷지연시간 관련 연구로 구분될 수 있다. 본 연구가 속하는 네트워크 평균패킷지연시간과 관련된 기존 연구를 살펴보면 다음과 같다. Pierre 등[14]은 시뮬레이티드 어닐링(simulated annealing)을 이용하여 평균패킷지연시간의 제약조건 하에 비용을 최소화하는 네트워크 설계 방법을 제시하였다. Pierre and Legault[16, 17]는

논문접수일 : 2010년 12월 22일 1차수정일 : 2011년 03월 09일 2차수정일 : 2011년 03월 22일 게재확정일 : 2011년 03월 22일

<sup>†</sup> 교신저자 yumcs@pknu.ac.kr

※ 이 논문은 2010학년도 부경대학교 박사 후 연수과정 지원사업에 의하여 연구되었음.

유전자 알고리즘(GA : Genetic Algorithm)을 이용하여 평균패킷지연시간을 제약조건으로 하고 비용을 최소화하는 네트워크 설계 방법을 제시하였다. 그리고 Pierre and Elgibaoui[15]는 Pierre 등[15]이 사용한 문제를 타부서치(tabu search)를 이용하여 풀었다. Konak and Smith[12]는 HGA(Hybrid Genetic Algorithm)을 이용하여 평균패킷지연시간 및 노드연결성(node connectivity) 제약 하에서 비용을 최소화하는 설계 방법을 제시하였다. 오동현, 염창선[2]은 지역탐색이 강화된 유전자 알고리즘을 이용하여 평균패킷지연시간 및 노드연결성 제약 하에서 비용을 최소화하는 네트워크 설계 방법을 제시하였다.

최근에 조합 최적화 문제, 정수계획 문제, 연속변수 최적화 문제 등에 주로 이용되어 왔던 Scatter Search(SS)가 네트워크 설계에 적용되고 있다. SS를 이용한 네트워크 설계에 대한 연구를 살펴보면, Alvarez, González-Velarde, and De-Alba[6, 7]는 capacitated multicommodity 네트워크 설계를 위해 SS와 GRASP(greedy randomized adaptive search procedure) embedded SS를 이용하는 방법을 제시하였다. Xu, Chiu, and Glover[11]는 tree-star 네트워크 설계를 위해 타부 서치와 SS를 이용하는 방법을 제시하였다. 이한진, 염창선[3]은 SS를 이용하여 신뢰성 제약조건 하에서 비용을 최소화하는 네트워크 설계 방법을 제시하였다. 그리고 이한진, 염창선[4]은 SS를 이용하여 신뢰성 제약조건 하에서 비용을 최소화하는 근거리 네트워크(LAN : Local Area Network) 설계 방법을 제시하였다. 그러나 평균패킷지연시간과 관련된 네트워크 설계에 SS를 이용한 연구는 이루어지지 않고 있는 실정이다.

그러므로 본 연구는 SS를 이용한 평균패킷지연시간 및 노드연결성 제약조건 하의 네트워크 설계 방법을 제시하고자 한다. 그리고 수치적 예제를 통해 본 연구에서 제시한 SS를 이용한 네트워크 설계 방법이 기존의 네트워크 설계문제에서 널리 이용되고 있는 GA를 이용한 설계 방법보다 더 효율적으로 해를 탐색한다는 것을 보여주고자 한다.

## 2. 네트워크 설계 문제의 표현

### 2.1 기본 가정 및 문제 모형

네트워크 설계를 위한 기본 가정은 다음과 같다(Pierre and Elgibaoui[9]).

- 노드는 완전히 신뢰할 수 있으며, 메모리는 무한하다.

- 각 링크는 무방향적(bi-directional)이다.
- 각 노드간의 트래픽은 포아송 분포이다.
- 패킷크기는 평균  $1/\lambda$  비트를 갖는 지수분포이다.

네트워크 설계와 관련된 표기는 다음과 같다.

- $E$  : 네트워크에 연결된 링크들의 집합
- $\{i, j\}$  : 노드  $i$ 와  $j$ 를 연결하는 링크
- $x_{i,j} (\in \{0, 1, 2, \dots, k-1\})$  :  $\{i, j\}$ 의 링크 유형, 여기서  $k$ 는 링크 유형의 가지 수
- $x (= \{x_{1,2}, x_{1,3}, \dots, x_{n-1,n}\})$  : 네트워크 구조
- $C(x)$  : 네트워크  $x$ 의 총 비용(\$)
- $D(x)$  : 네트워크  $x$ 의 평균패킷지연시간(msec)
- $D_{max}$  : 요구된 최대 평균패킷지연시간(msec)

SS를 위한 표기는 다음과 같다.

- $p$  : 모집단(population)의 크기
- $b_1$  : 참조해 집단(reference set)에서 우수한 해의 개수
- $b_2$  : 참조해 집단에서 다양화된 해의 개수
- $i$  : 탐색 반복수
- $i_{max}$  : 탐색 최대 반복수
- $l$  : 지역탐색 반복수
- $l_{max}$  : 지역탐색 최대 반복수

본 연구에서 사용되는 평균패킷지연시간과 노드연결성 제약을 갖는 네트워크 설계 문제는 다음과 같이 모형화될 수 있다.

$$\text{목적함수 : Minimize } C(x) = \sum_{i,j \in E} c_{ij} \quad (1)$$

$$\text{제약조건 : } D(x) \leq D_{max} \quad (2)$$

$$2 \text{ 노드연결성} \quad (3)$$

여기서,  $c_{ij}$ 는 링크  $\{i, j\}$ 의 비용으로,  $c_{ij} = \alpha_{ij} \cdot d_{ij} + \beta_{ij}$ 로 표현될 수 있다.  $\alpha_{ij}$ 는 단위거리 당 링크  $\{i, j\}$ 의 비용으로 변동비용(variable cost)에 해당되며,  $d_{ij}$ 는 링크  $\{i, j\}$ 의 거리이다.  $\beta_{ij}$ 는 링크  $\{i, j\}$ 를 연결하는데 사용된 모델이나 인터페이스 장비에 대한 비용으로 고정비용(fixed cost)에 해당된다(Pierre and Elgibaoui[9]). 2 노드연결성이란 한 노드에서 다른 노드로의 연결경로가 반드시 2개 이상이어야 한다는 것을 의미한다. 이는 어느 한 노드에서 다른 노드로 통신을 하고자 할 때, 한 개의 연결경로가 고장(failure)일 경우에도 여타 경로를 통해 다른 노드와의 통신을 보장하도록 하기 위함이다(Pierre and Elgibaoui[9]).

## 2.2 네트워크 설계 구조의 표현

<표 1>은 5개 노드로 구성된 네트워크의 노드 간 링크 유형을 보여 주고 있다. 각 셀의 값은 링크 유형을 의미한다. 링크 유형은 노드 간 데이터를 전송하기 위한 설치링크의 종류(구리선, 동축케이블, 광케이블 등)를 말하며, 링크 유형에 따라 설치비용과 전송 가능한 데이터 량에 차이가 있다.

<표 1> 네트워크의 노드 간의 링크 유형

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

주) 링크 유형은 5가지로 0(비연결), 1, 2, 3, 4임.

위의 네트워크 구조는 다음과 같은 하나의 해로 표현될 수 있다.

해 : {2 4 0 2 4 0 0 3 2 0}

이는 <표 1>의 우 상향 삼각형 모양의 각 행을 1줄로 나열한 것으로, 네트워크의 노드 간 링크 유형이 해의 원소값으로 표현된 것이다.

## 3. Scatter Search를 이용한 네트워크 설계 절차

SS는 탐색 과정에 축적된 과거 역사를 감안하여 보다 체계적으로 해를 생성한다(Glover et al.[19], Laguna and Marti[13]). 또한 SS는 많은 최적화 문제에서 그 효과가 입증된 다양화(diversification) 전략과 강화(intensification) 전략을 사용한다(송한식[1]). SS를 이용한 경제적 네트워크 설계의 단계별 주요 절차는 아래와 같다.

### (1) 초기 모집단 생성

- (a) seed 해를 무작위로 생성하고 교란(perturbation)시킨다.
- (b) 교란시킨 해를 평균패킷지연시간 계산함수로 보낸다.
- (c) 교란시킨 해를 개선한다.

### (2) 초기 참조해 집단 생성

- (a) 초기 모집단을 비용 계산 함수로 보낸다.
- (b) 초기 모집단으로부터 우수한 해와 다양화된 해로 구성된 참조해 집단을 생성한다.

### (3) 반복적인 지역탐색 과정

#### (a) 결합해 생성

- 참조해 집단으로부터 두 개의 해를 선택하여 결합해를 생성한다.
- 결합해를 평균패킷지연시간 및 비용 계산함수로 보낸다.
- 결합해를 개선시킨다.

#### (b) 참조해 집단 갱신

- 결합해를 바탕으로 참조해 집단을 갱신한다.
- 참조해 집단의 가장 우수한 해를 검사한다.
- 참조해 집단을 이전 참조해 집단과 비교한다.
  - 만일 새로운 해가 추가되었고 지역탐색 최대 반복수에 도달하지 못했으면( $l < l_{max}$ ), (a)로 간다.
  - 그렇지 않으면 (4)로 간다.

### (4) 탐색 최대 반복수 확인

- (a) 만일 탐색 최대 반복수에 도달했으면( $i = i_{max}$ ), (6)으로 간다.
- (b) 그렇지 않으면 (5)로 간다.

### (5) 다양화된 해를 통한 참조해 집단 갱신

- (a) 새로운 다양화된 해를 생성하여 참조해 집단을 갱신한다.
- (b) 참조해 집단을 비용 계산 함수로 보낸다.
- (c) (3)으로 간다.
- (6) 가장 우수한 최종해를 검사한다.

## 3.1 초기 모집단의 생성

Seed 해를 생성하기 위해 각 원소 값에 대해  $k$ 가지의 링크유형 중 하나를 무작위로 선택한다. 생성된 seed 해의 원소를 한 개 이상 교란시켜 얻은 교란해(perturbation solution)와 교란해의 보수(complement)를 이용하여 해를 생성한다(Glover[10]). 이때 해가 2노드 연결성 제약조건을 만족하지 못한 경우, Ahuja et al.[5]에 의해 제안된 shortest path-augmenting algorithm을 확장한 Konak and Smith[12]의 노드연결성 수리 알고리즘을 이용하여 만족하도록 수리한다. 그리고 이 해의 평균패킷지연시간 제약조건에 대한 만족 여부를 확인하기 위해 평균패킷지연시간 계산함수로 보낸다. 해  $x$ 에 대한 평균패킷지연시간,  $D(x)$ 을 계산하기 위한 식은 다음과 같다.

$$D(x) = \frac{1}{\gamma} \sum_{(i,j) \in E} \frac{t_{ij}}{(r_{ij} - t_{ij})} \quad (4)$$

여기서  $\gamma$ 는 네트워크 설계에 대한 총 트래픽이다.  $t_{ij}$ 는  $\{i, j\}$ 의 링크 트래픽 플로우로 Dijkstra의 최단경로 알고리즘(Konak and Smith[12]; Ahuja et al.[15])을 이용하여 계산할 수 있다.  $r_{ij}$ 는  $\{i, j\}$ 의 링크 유형에 종속되는 링크 용량이다. 단,  $\{i, j\}$ 의 링크 용량( $r_{ij}$ )은 해당 링크의 트래픽 플로우( $t_{ij}$ )를 초과하도록 설정되어야 한다( $r_{ij} > t_{ij}$ ).

해가 평균패킷지연시간 제약조건을 만족하지 못한 경우, Konak and Smith[12]의 the longest path 알고리즘을 이용하여 만족하도록 수리한다.

### 3.2 초기 참조해 집단의 생성

참조해 집단은 SS의 효율적인 해의 탐색을 위한 방법인 강화 전략과 다양화 전략을 구현하기 위해 모집단 중 우수한 해들과 우수한 해와 이질성(heterogeneity) 정도가 높은 해들로 구성된 해 집단이다.

초기 참조해 집단의 생성을 위해, 초기 모집단을 비용 계산함수로 보내서 비용이 적은 순서로  $b_1$ 개의 해를 먼저 선택한다. 나머지 해 각각에 대하여,  $b_1$ 개의 해로부터의 이질성 정도를 계산하여 나머지 해 중에서 최대 최소(maximin) 순서로  $b_2$ 개의 해를 선정한다. 이질성 정도는 다양성 척도(diversity measure)로써 두 해의 대응하는 원소값 간의 이질적 거리에 대한 절대차의 합(sum of the absolute difference)으로 계산할 수 있다(Laguna and Marti[13]). 예를 들어, 다음 두 해의 대응하는 원소값 간 절대차의 합이 9이므로 두 해의 이질성은 9이다.

해 1	{ 2 3 0 0 2 0 1 2 0 2 }
해 2	{ 3 2 0 3 3 0 1 1 1 3 }
절대차	1 1 0 3 1 0 0 1 1 1      절대차의 합 = 9

비용이 적은  $b_1$ 개의 우수한 해와  $b_2$ 개의 다양화된 해를 합하여 초기 참조해 집단을 구성한다. 참조해 집단은 모집단 해 중에서 우수한 해와 그 해의 인근 지역을 한정하여 탐색하는 지역탐색을 가능하게 한다. 초기 참조해 집단 중에서 가장 우수한 해를 검사한다(송한식[1]; 이한진, 염창선[3]).

### 3.3 반복적인 지역탐색 과정

#### (1) 결합해 생성

참조해 집단에서 선택한 두 개의 해를 연산하여 결합해를 생성한다. 선택된 두 개의 해의 각 대응하는 원소의 값이 같으면 결합해의 대응하는 원소값을 0으로

한다. 대응하는 원소의 값이 다르면 두 원소값의 합을 결합해의 원소값으로 한다. 단, 두 원소값의 합이 허용하는 최대 원소값(링크 수준)을 넘으면 최대 원소값만큼 뺀 값을 결합해의 원소값으로 한다. 예를 들어, 최대 원소값이 3인 경우, 두 참조해가 선택되었다면, 두 참조해로부터 생성되는 결합해는 다음과 같다.

참조해 1	{ 3 0 0 3 3 0 1 2 0 3 }
참조해 2	{ 2 0 0 3 2 0 1 1 1 3 }
결합해	2 0 0 0 2 0 0 3 1 0

이때 결합해가 2노드 연결성 제약조건을 만족하지 못한 경우, 노드연결성 수리 알고리즘을 이용하여 수리한다. 개선된  $p$ 개의 해로 초기 모집단을 구성한다. 결합해를 초기해와 동일한 방법으로 개선시킨다.

#### (2) 결합해를 통한 참조해 집단 갱신

결합해를 참조해 집단의  $b_1+b_2$ 개 해와 비교하여, 우수성과 다양성이 인정되면 참조해 집단의 우수성이나 다양성이 가장 낮은 해와 교체한다(Laguna and Marti[13]). 갱신된 참조해 집단이 이전의 참조해 집단과 비교했을 때, 새로운 해가 추가되었고 아직 지역탐색 최대 반복수에 도달하지 못했으면, 지역 탐색과정을 반복하여 실행한다. 그렇지 않으면, 제 3.4절에 기술된 다양화된 해를 통해 참조해 집단을 갱신한 후 지역탐색 과정을 실행한다.

### 3.4 다양화된 해를 통한 참조해 집단 갱신

참조해 집단의 우수한 해( $b_1$ 개)를 보존하고, 초기 참조해 집단의 다양화된 해 생성과 동일한 방법으로  $b_2$ 개의 다양화된 새로운 해를 생성한다. 보존된  $b_1$ 개의 해와 새로 구한 다양화된  $b_2$ 개의 해를 합하여 새로운 참조해 집단으로 삼는다. 새로이 생성된 참조해 집단을 대상으로 지역탐색 과정을 실행한다.

## 4. Scatter Search를 이용한 네트워크 설계의 성능 평가

이 장에서는 평균패킷지연시간과 노드연결성이 제약된 두 개의 네트워크 문제를 통해, 본 연구에서 제시하는 SS를 이용한 설계 방법의 성능을 실험한다. 실험은 Intel Core2 Duo(2.66GHz)와 3GB RAM으로 구성된 PC 환경에서 이루어졌다.

첫 번째 문제(문제 1)는 6개의 노드를 연결하는 경우

로 링크 유형은 5가지이다. 두 번째 문제(문제 2)는 15개의 노드를 연결하는 경우로 링크 유형은 15가지이다. 두 문제를 위해 사용된 각 노드의 좌표는 <표 2>와 같고, 각 링크 유형의 속성은 <표 3>와 같다. 그리고 노드 간 트래픽 매트릭스는 <표 4>와 같다. 두 문제를 위한 패킷크기는 평균 1000비트이다.

<표 2> 각 노드별 좌표

노드	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
가로 좌표	63	22	41	33	32	40	52	80	19	15	27	27	70	48	4
세로 좌표	8	72	45	10	84	78	52	33	35	81	3	16	96	4	73

주) 문제 1은 노드 1~6을 사용함.

<표 3> 링크 유형의 속성

링크 유형	변동비용 (\$/km)	고정비용 (\$)	링크용량 (KB/sec)
0(비연결)	0.00	0.00	0.00
1	0.40	650.00	9.60
2	2.50	850.00	19.20
3	7.50	850.00	50.00
4	10.00	1700.00	100.00
5	30.00	2350.00	230.40
6	60.00	4700.00	460.80
7	120.00	9400.00	921.60
8	240.00	18800.00	1843.20

주) 문제 1은 링크 유형 0~4를 사용함.

<표 4> 노드 간 트래픽 매트릭스

노드	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	0	4	7	8	6	9	5	5	9	3	9	3	6	4	3
2	4	0	9	3	2	8	3	1	2	9	8	10	6	10	3
3	7	9	0	7	10	10	6	5	5	10	6	8	8	9	1
4	8	3	7	0	9	6	5	4	7	3	7	6	8	5	9
5	6	2	10	9	0	8	1	3	8	6	6	7	6	3	3
6	9	8	10	6	8	0	10	9	6	7	1	5	1	5	9
7	5	3	6	5	1	10	0	9	7	4	7	6	2	8	5
8	5	1	5	4	3	9	9	0	9	4	4	4	1	5	10
9	9	2	5	7	8	6	7	9	0	6	7	1	4	5	10
10	3	9	10	3	6	7	4	4	6	0	10	2	6	5	7
11	9	8	6	7	6	1	7	4	7	10	0	5	4	6	10
12	3	10	8	6	7	5	6	4	1	2	5	0	3	6	5
13	6	6	8	8	6	1	2	1	4	6	4	3	0	3	9
14	4	10	9	5	3	5	8	5	5	6	6	3	0	3	3
15	3	3	1	9	3	9	5	10	10	7	10	5	9	3	0

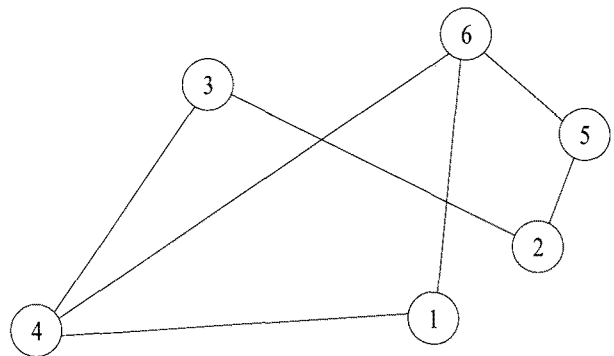
주) 문제 1은 노드 1~6 간의 트래픽을 사용함.

#### 4.1 문제 1 : 6개 노드 연결

문제 1은 5가지 링크 유형을 있을 때 이를 가지고 6

개의 노드를 연결하는 문제이다. 이 문제에 대해 SS를 이용한 설계 방법을 적용하여 네트워크를 설계하였다. 초기 탐색 실험을 통해 SS의 초기화 값( $p = 18, b_1 = 4, b_2 = 5, i_{max} = 10,000, l_{max} = 20$ )을 얻은 후,  $D_{max} = 80$ 에 대해 10개의 seed를 가지고 실험을 수행하였다.

초기 반복수( $i = 1$ )에서는 <그림 1>과 같은 설계 구조를 갖고, 네트워크 비용이 10,432.06\$, 평균패킷지연시간이 78.17(msec)인 가장 우수한 해 {003033030404004}를 찾았다. <표 5>은 가장 우수한 초기해의 노드 간 링크 유형을 나타내고 있다. 그리고 최대 반복수( $i = i_{max}$ )까지 실험을 수행한 결과, <그림 2>와 같은 설계구조를 갖고, 네트워크 비용이 9,799.86\$, 평균패킷지연시간이 72.46(msec)인 가장 우수한 최종해 {003033003433003}을 찾았다. <표 6>은 가장 우수한 최종해의 노드 간 링크 속성을 나타내고 있다.

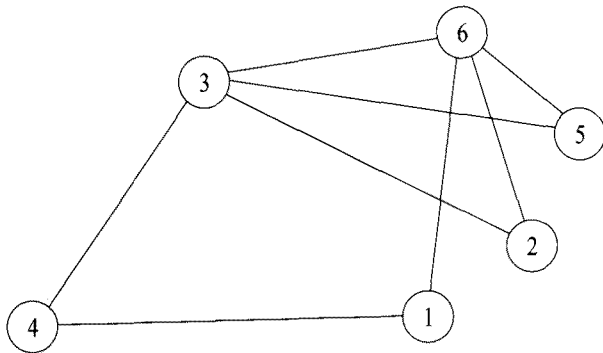


<그림 1> 가장 우수한 초기해(10,432.06\$)

<표 5> 가장 우수한 초기해에 대한 링크 속성 ( $D_{max} = 80$ msec)

Link(i, j)	Link Type	Capacity (KB/sec)	Flow (KB/sec)
(1, 4)	3	50.00	38.00
(1, 6)	3	50.00	30.00
(2, 3)	3	50.00	32.00
(2, 5)	3	50.00	20.00
(3, 4)	4	100.00	72.00
(4, 6)	4	100.00	70.00
(5, 6)	4	100.00	82.00

다음으로 다양한 평균패킷지연시간( $D_{max} = 25, 50, 80, 100, 150, 200$ )에 대해, SS를 이용한 설계 방법과 GA를 이용한 설계 방법(Pierre and Legault[16]; Pierre and Legault[17]; 오동현, 염창선[2])과의 성능을 비교하고자 한다. <표 7>과 <표 8>은  $D_{max}$ 의 변화에 따른 SS와 GA를 이용하여 찾은 가장 우수한 최종해를 보여주고 있다.  $D_{max} = 25, 200$ 일 경우



<그림 2> 가장 우수한 최종해(9,799.86\$)

<표 6> 가장 우수한 최종해에 대한 링크 속성  
( $D_{max} = 80\text{msec}$ )

Link(i, j)	Link Type	Capacity (KB/sec)	Flow (KB/sec)
(1, 4)	3	50.00	30.00
(1, 6)	3	50.00	38.00
(2, 3)	3	50.00	24.00
(2, 6)	3	50.00	28.00
(3, 4)	4	100.00	64.00
(3, 5)	3	50.00	38.00
(3, 6)	3	50.00	32.00
(5, 6)	3	50.00	32.00

<표 7>  $D_{max}$ 에 변화에 따른 가장 우수한 최종해(SS이용한 설계 방법)

$D_{max}$ (msec)	$C(x)$ (\$/month)	$D(x)$ (msec)	$x$
25	16444.40	24.93	043004040444034
50	11561.51	48.10	003043003440004
80	9799.86	72.46	003033003433003
100	9799.86	72.46	003033003433003
150	9774.71	103.58	003033030433003
200	9157.12	171.90	003033033303300

에 SS를 이용한 설계 방법과 GA를 이용한 설계 방법이 동일한 가장 우수한 최종해를 찾았고, 나머지 최대 평균패킷 제약조건( $D_{max} = 50, 80, 100, 150$ )에서는 SS를 이용한 설계 방법이 GA를 이용한 설계 방법 보다 나은 우수한 최종해를 찾았다. 이러한 결과는 본 연구에서 제시한 SS를 이용한 설계 방법이 GA를 이용한 설계 방법보다 우수하다는 것을 의미한다.

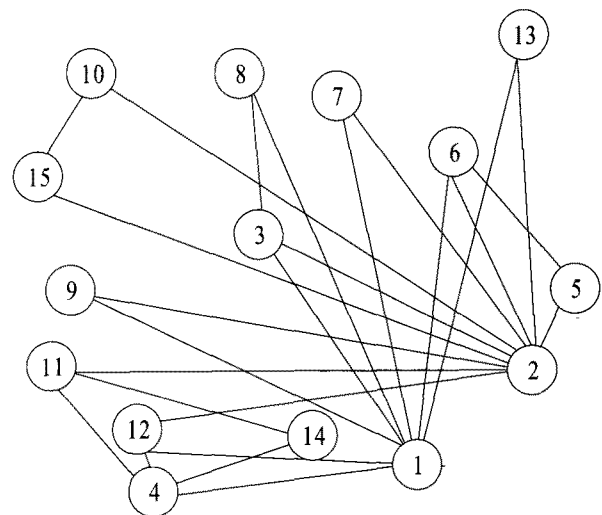
<표 8>  $D_{max}$ 에 변화에 따른 가장 우수한 최종해 (GA이용한 설계 방법)

$D_{max}$ (msec)	$C(x)$ (\$/month)	$D(x)$ (msec)	$x$
25	16444.40	24.93	043004040444034
50	12010.90	49.84	043000034034330
80	10506.60	77.68	043003103033033
100	10475.70	88.17	003033303034300
150	9832.30	124.73	003033133303300
200	9157.12	171.90	003033033303300

4.2 문제 2 : 15개 노드 연결

문제 2는  $D_{max} = 150(\text{msec})$ 하에서 9가지 링크 유형이 있을 때 15개의 노드를 연결하는 문제이다. 이 문제에 대해 SS를 이용한 설계 방법을 적용하여 네트워크를 설계하였다. 이 문제를 위한 노드의 좌표, 링크 유형의 속성, 노드 간 트래픽은 <표 2> ~ <표 4>에 나타나 있다.

초기 탐색 실험을 통해 초기화 값( $p = 40, b_1 = 10, b_2 = 10, i_{max} = 20,000, l_{max} = 20$ )을 얻은 후,  $D_{max} = 150$ 에 대해 10개의 seed를 가지고 실험을 수행하였다. 초기 반복수( $i = 1$ )에서는 <그림 3>과 같은 설계 구조를 갖고, 네트워크 비용이 55,304.96\$, 평균패킷지연시간이 134.48(msec)인 가장 우수한 초기해{045034440033005055404545405000040000000000000450503002002000000}를 찾았다.



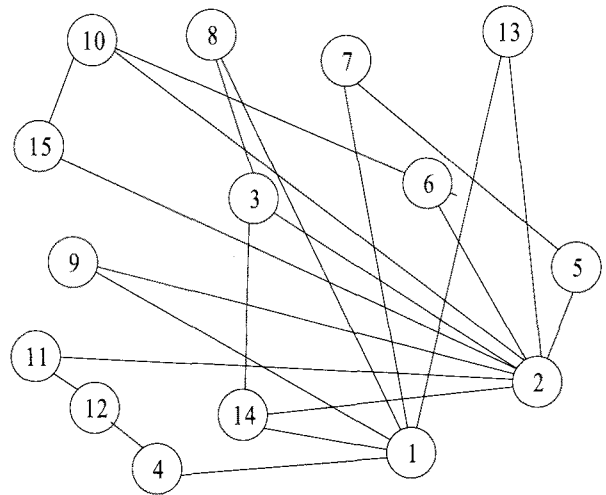
<그림 3> 가장 우수한 초기해(55,304.96\$)

<표 9>은 가장 우수한 초기해의 노드 간 링크 유형을

나타내고 있다. 그리고 최대 반복수( $i = i_{max}$ )까지 실험을 수행한 결과, <그림 4>와 같은 설계구조를 갖고, 네트워크 비용이 53,217.23\$, 평균패킷지연시간이 130.13 (msec)인 가장 우수한 최종해 {005004440003505055004550445000040000040000000050000400000000002000 000000000000000000000000025000000000}을 찾았다. <표 10>은 가장 우수한 최종해의 노드 간 링크 속성을 나타내고 있다.

<표 9> 가장 우수한 초기해에 대한 링크 속성 ( $D_{max} = 150msec$ )

Link(i, j)	Link Type	Capacity (KB/sec)	Flow (KB/sec)
(1, 3)	4	100.00	94.00
(1, 4)	5	230.40	212.00
(1, 6)	3	50.00	30.00
(1, 7)	4	100.00	80.00
(1, 8)	4	100.00	82.00
(1, 9)	4	100.00	76.00
(1, 12)	3	50.00	44.00
(1, 13)	3	50.00	36.00
(2, 3)	5	230.40	192.00
(2, 5)	5	230.40	128.00
(2, 6)	5	230.40	154.00
(2, 7)	4	100.00	76.00
(2, 9)	4	100.00	96.00
(2, 10)	5	230.40	150.00
(2, 11)	4	100.00	78.00
(2, 12)	5	230.40	176.00
(2, 13)	4	100.00	98.00
(2, 15)	5	230.40	160.00
(3, 8)	4	100.00	64.00
(4, 11)	4	100.00	90.00
(4, 12)	5	230.40	146.00
(4, 14)	5	230.40	142.00
(5, 6)	3	50.00	28.00
(10, 15)	2	19.20	14.00
(11, 14)	2	19.20	12.00

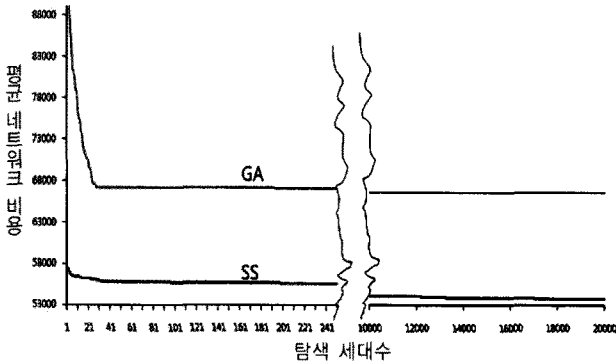


<그림 4> 가장 우수한 최종해(53,217.23\$)

<표 10> 가장 우수한 최종해에 대한 링크 속성 ( $D_{max} = 150msec$ )

Link(i, j)	Link Type	Capacity (KB/sec)	Flow (KB/sec)
(1, 4)	5	230.40	216.00
(1, 7)	4	100.00	92.00
(1, 8)	4	100.00	82.00
(1, 9)	4	100.00	76.00
(1, 13)	3	50.00	42.00
(1, 14)	5	230.40	166.00
(2, 3)	5	230.40	184.00
(2, 5)	5	230.40	216.00
(2, 6)	5	230.40	174.00
(2, 9)	4	100.00	96.00
(2, 10)	5	230.40	136.00
(2, 11)	5	230.40	208.00
(2, 13)	4	100.00	92.00
(2, 14)	4	100.00	90.00
(2, 15)	5	230.40	160.00
(3, 8)	4	100.00	64.00
(3, 14)	4	100.00	62.00
(4, 12)	5	230.40	214.00
(5, 7)	4	100.00	88.00
(6, 10)	2	19.20	14.00
(10, 15)	2	19.20	14.00
(11, 12)	5	230.40	208.00

<그림 5>는 10개의 seed를 사용하여, SS를 이용한 설계 방법과 GA를 이용한 설계 방법의 탐색 세대 수에 따른 평균 네트워크 비용의 변화를 나타내고 있다.



<그림 5> 탐색 세대 수에 따른 평균 네트워크 비용의 변화

SS를 이용한 설계 방법은 탐색 세대 수가 증가함에 따라 평균 네트워크 비용이 점차 떨어져 약 17,000세대 수에서 약 53,877.34\$로 수렴한 반면에, GA를 이용한 설계 방법은 탐색 세대 수가 약 200세대 수에서 약 67,013.37\$로 수렴한 이후 평균 네트워크 비용이 거의 감소하지 않았다. 이는 노드 수가 큰 네트워크 설계에 있어서도 SS를 이용한 설계 방법이 GA를 이용한 네트워크 설계 방법보다 우수하다는 것을 의미한다.

## 5. 결 론

기업의 네트워크 속도 지연과 회로의 단절은 기업 업무활동에 직접적인 피해를 준다. 그러므로 기업들은 네트워크 시스템의 안정적인 운용을 위해 노드 간에 다중 연결회로를 갖고 속도 지연이 발생하지 않는 네트워크의 설치를 원하고 있다. 이러한 기업의 요구에 부응하는 위해 그 동안 휴리스틱 알고리즘을 이용하는 평균패킷지연시간과 노드연결성 제약 하의 네트워크 설계가 연구되어 왔다. 최근에는 휴리스틱 알고리즘 중에 유전자 알고리즘이 주로 이용되고 있다. 그리고 최근에는 유전자 알고리즘과 유사한 진화기법으로 여러 최적화 문제 등에서 널리 사용되고 있는 Scatter Search 알고리즘이 네트워크 설계에 적용되기 시작하고 있다.

본 연구에서는 평균패킷지연시간과 노드연결성 제약 하에서 경제성 있는 네트워크 설계 문제에 대해, Scatter Search를 이용하는 설계 방법을 제시하였다. 그리고 두 개의 네트워크 설계 문제를 통해, Scatter Search를 이용한 네트워크 설계 방법이 유전자 알고리즘을 이용한 네트워크 설계 방법 보다 우수한 해를 찾는다

는 것을 보였다.

본 연구에서 제시한 경제적 네트워크 설계 방법이 네트워크 속도와 성능을 중요시 하는 기업의 네트워크 구축을 위해 유용한 참고가 되길 기대한다.

## 참고문헌

- [1] 송한식; “함수추정을 위한 시뮬레이션 최적화 : Scatter Search의 경우”, 한국생산관리학회지, 17(2) : 133-154, 2006.
- [2] 오동현, 염창선; “네트워크 설계를 위한 유전자 알고리즘의 성능 분석”, 한국경영공학회지, 13(1) : 147-154, 2008.
- [3] 이한진, 염창선; “Scatter Search를 이용한 신뢰성 있는 네트워크의 경제적 설계”, 산업경영시스템학회지, 31(1) : 101-107, 2008.
- [4] 이한진, 염창선; “Scatter Search를 이용한 LAN의 경제적 설계”, 한국경영공학회지, 14(3) : 13-22, 2009.
- [5] Ahuja, R. K., Magnanti, T. L., and Orlin, J. B.; *Network Flows : Theory, Algorithms, and Applications*, New Jersey : Prentice Hall, 1993.
- [6] Alvarez, A. M., González-Velarde, J. L., and De-Alba, K.; “Scatter Search for Network Design Problem,” *Annals of Operations Research*, 138(1) : 159-178, 2005a.
- [7] Alvarez, A. M., González-Velarde, J. L., and De-Alba, K.; “Grasp Embedded Scatter Search for the Multicommodity Capacitated Network Design Problem,” *Journal of Heuristics*, 11(3) : 233-257, 2005b.
- [8] Cancela, H. and El Khadiri, M.; “A Recursive Variance-Reduction Algorithm for Estimating Communication-Network Reliability,” *IEEE Transactions On Reliability*, 44(4) : 595-602, 1995.
- [9] Dengiz, B., Altıparmak, F., and Smith, A. E.; “Local Search Genetic Algorithm for Optimal Design of Reliable Networks,” *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 1(3) : 179-188, 1997.
- [10] Glover, F.; “Heuristics for Integer Programming Using Surrogate Constraints,” *Decision Science*, 8 : 156-166, 1977.
- [11] Glover, F., Laguna, M., and Marti, M.; “Fundamentals of Scatter Search and Path Relinking,” *Control and Cybernetics*, 39(3) : 653-684, 2000.
- [12] Konak A. and Smith A.; “A Hybrid Genetic Algorithm Approach for Backbone Design of Communication Networks.” in : *Proceedings of the 1999 Congress on Evolutionary Computation*, Washington D. C., IEEE, 1999.



- [13] Laguna, M. and Marti, R.; Scatter search. Methodology and implementation in C., Boston : *Kluwer Academic Publishers*, 2003.
- [14] Pierre, S., Hyppolite, M., Bourjolly J., and Dioume, O.; "Topological Design of Computer Communication Networks Using Simulated Annealing," *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 8(1) : 61-69, 1995.
- [15] Pierre, S. and Elgibaoui, A.; "A Tabu-Search Approach for Designing Computer-Network Topologies with Unreliable Components," *IEEE Transactions on Reliability*, 46(3) : 350-359, 1997.
- [16] Pierre, S. and Legault G.; "An Evolutionary Approach for Configuring Economical Packet-switched Computer Networks," *Artificial Intelligence in Engineering*, 10(2) : 127-134, 1996.
- [17] Pierre, S. and Legault G.; "A Genetic Algorithm for Designing Distributed Computer Network Topologies," *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 28(2) : 249-258, 1998.
- [18] Wood, R. K.; "Factoring Algorithms for Computing K-Terminal Network Reliability," *IEEE Transactions On Reliability*, 35(3) : 269-278, 1986.
- [19] Xu, J., Chiu, S., and Glover, F.; "Tabu Search and Evolutionary Scatter. Search for 'Tree-Star' Network Problems, with Applications to Leased-Line Network Design," *Telecommunications Optimization : Heuristic and Adaptive Techniques*, Corne, D. (Ed.), John and Wiley and Sons, 2000.