

## 패킷 통신 네트워크 설계를 위한 시뮬레이티드 애닐링 방법에서 초기해와 후보해 생성방법

임동순\* · 우훈식\*\*

### Generating Mechanisms of Initial and Candidate Solutions in Simulated Annealing for Packet Communication Network Design Problems

Dong-Soon Yim\* · Hoon-Shik Woo\*\*

#### ■ Abstract ■

The design of a communication network has long been a challenging optimization problem. Since the optimal design of a network topology is a well known as a NP-complete problem, many researches have been conducted to obtain near optimal solutions in polynomial time instead of exact optimal solutions. All of these researches suggested diverse heuristic algorithms that can be applied to network design problems. Among these algorithms, a simulated annealing algorithm has been proved to guarantee a good solution for many NP-complete problems. In applying the simulated annealing algorithms to network design problems, generating mechanisms for initial solutions and candidate solutions play an important role in terms of goodness of a solution and efficiency. This study aims at analyzing these mechanisms through experiments, and then suggesting reliable mechanisms.

Keyword : Network Design, Topology, Optimization, Simulated Annealing

논문접수일 : 2004년 2월 9일      논문게재확정일 : 2004년 8월 24일

\* 한남대학교 산업시스템공학전공

\*\* 대전대학교 인터넷정보공학전공

## 1. 서 론

통신 네트워크 설계에서 중요한 문제 중의 하나는 토폴로지를 결정하는 것이다. 특히, 일정 기준의 성능과 신뢰도 조건을 만족하면서 최소의 비용으로 통신망이 구성되도록 하는 최적의 네트워크 토폴로지를 결정하는 것이 매우 중요하다.

통신 네트워크 토폴로지 문제는 기본적으로 순열 최적화 문제로 NP-complete 문제이다[1, 4, 8]. 따라서, 네트워크 교환 노드의 수가 증가하는 경우 제한된 시간 안에 최적해를 산출하는 것은 매우 어려우며 결국 제한된 시간에 우수한 해를 제공하는 휴리스틱 알고리즘을 사용하는 것이 보다 합리적이다.

최적의 네트워크 설계를 위해 개발된 경험적 방법으로는 branch exchange[11, 15], cut saturation [5], 유전자 알고리즘[2, 8, 13], MENTOR 알고리즘 [6, 7], 시뮬레이티드 애닐링 알고리즘[12] 등이 있다. 이 중 유전자 알고리즘과 시뮬레이티드 애닐링 알고리즘은 메타 휴리스틱 방법에 속하며 일반적인 NP-complete 문제에 매우 우수한 결과를 가져온다고 알려져 있다. 특히, 제한조건이 복잡하고 많은 경우의 네트워크 설계 문제에 매우 효과적으로 이용될 수 있는 장점을 갖고 있다.

본 연구에서는 통신망의 네트워크 설계를 위한 시뮬레이티드 애닐링 알고리즘을 대상으로 보다 우수한 결과를 가져올 수 있는 방안을 제안하고자 한다. 시뮬레이티드 애닐링 방법에서 중요한 요소는 초기해를 결정하는 방법과 후보해를 생성하는 방법이다. 일반적으로 초기해는 주어진 문제의 제한 조건을 만족하는 임의의 해를 사용할 수 있다. Pierre [12]는 시뮬레이티드 애닐링을 사용하여 통신 네트워크 토폴로지 문제를 해결하면서 최소절침나무에 기초한 초기해를 사용하였다. 하지만, 시뮬레이티드 애닐링을 이용한 기존 연구에서 알고리즘이 초기해 결정 방법에 일부 영향을 받는 경우가 있으므로, 초기해가 알고리즘의 성능에 어떠한 영향을 주는지에 대한 분석이 필요하다. 이를 위하여 최소절침나무와 본 연구에서 새로이 시도하는 해밀토니안 서킷

에 기초한 초기해 생성방법에 대해 실험하고 분석하였다. 또한, 다양한 규칙과 연산을 고려하여 통신 네트워크 설계에 적합한 후보해 생성 방법을 정의할 수 있다. 기존 연구에서 정의된 통신 네트워크 내의 노드와 에지간 단순 교환 연산에서 탈피하여 본 연구에서는 다양한 연산 방법을 새로 정의하고 비교 실험하였으며 분석을 통하여 가장 효과적인 해 생성 방법을 제안하고자 한다.

## 2. 패킷 통신 네트워크 토폴로지 문제

통신 네트워크의 기본적인 토폴로지는 방향성이 없는 그래프  $G(V, E)$ 로 표현될 수 있다.  $V$ 는 노드(vertex)들의 집합이고,  $E$ 는 두 노드를 잇는 에지(edge)들의 집합으로 통신 라인을 의미한다. 최적의 그래프  $G(V, E)$ 를 구하는 정형화된 문제를 정의하기 위해 다음과 같은 기호를 사용하기로 한다.

### • 기호

- $n$  : 노드의 수
- $m$  : 에지의 수
- $l$  : 라인 형태의 수
- $d(i, j)$  : 두 노드  $i$ 와  $j$ 간의 거리(km)
- $r(i, j)$  : 노드  $i$ 에서 노드  $j$ 로 보내는 초 당 전송 패킷 수
- $K$  : K-연결성 계수
- $T_0$  : 네트워크에 허용되는 최대 지연시간(초)
- $u_{eb}$  : 에지  $e$ 에 대해 라인 형태  $b$ 인 경우 비용(원)
- $c_b$  : 라인 형태  $b$ 의 최대 용량(bps)
- $c_e$  : 에지  $e$ 에 결정된 라인 용량(bps)
- $f_e$  : 에지  $e$ 를 통한 초당 통신량
- $x_{eb}$  : 에지  $e$ 에 대해 라인 형태  $b$ 가 선택되면 1 아니면 0

위의 기호를 이용한 패킷 통신 네트워크 토폴로지 문제의 목적함수는 다음과 같다.

$$\text{Min } Z = \sum_{e \in E} \sum_{b=1}^l u_{eb} x_{eb}$$

이 목적함수는 네트워크에서 사용되는 통신 라인들에 대한 총비용을 최소화하는 것이다. 한 라인의

비용은 그 라인의 거리와 라인의 형태에 따른 비용으로 산정된다. 라인의 형태는 일반적으로 초당 전송량(byte/second : BPS)에 따라 정의된다. 만약, 새로운 통신 라인을 설치한다면 라인의 형태에 따른 설치 비용과 운영 비용을 고려하여 비용을 산정하여야 할 것이고, 라인을 통신 회사로부터 임대하는 경우에는 라인의 형태에 따른 임대 비용을 산정하여야 할 것이다.

본 연구에서는 두 노드를 연결하는 라인은 최대 하나인 경우로 한정하며 각 라인은 고유의 라인 형태에 속한다고 가정한다. 즉, 통신 네트워크에 포함된 각 에지  $e$ 에 대해 다음 식이 성립한다.

$$\sum_{b=1}^l x_{eb} = 1$$

이 제한식의 의미는 결정하여야 할 변수  $x_{eb}$ 의 어떤 에지  $e$ 가 그래프에 포함되어야 하는지를 결정하여야 한다는 것이다.

통신 네트워크 설계 문제에서 일반적으로 고려되는 제한 조건은 다음과 같다.

### 2.1 통신 지연시간

평균 지연시간  $T$ 는 패킷이 네트워크 상의 라인을 통하여 전송되기 위해 대기하고 있는 시간으로 주어진 최대 지연시간  $T_0$ 보다 작아야 한다. Kleinrock[10]은 각 통신라인들을 독립적인 M/M/1 대기로 가정하여 전체 통신 네트워크 상에서의 평균 지연시간을 계산하는 모델을 작성하였다. 이에 따르면 네트워크의 평균 지연시간은 다음과 같다.

$$T = \frac{1}{\gamma} \sum_{e \in E} \frac{f_e}{c_e - f_e}$$

단,  $\gamma = \sum_{i \neq j} \gamma(i, j)$

위 식에서 주어진 네트워크의 라인을 통한 통신량  $f_e$ 를 추정하여 이에 따른 라인의 용량  $c_e$  구하여야 한다. 라인 통신량  $f_e$ 는 두 노드간에 요구되는

전송량  $r(i, j)$ 와 전송 패킷의 라우팅 결정에 의존한다. 통신 네트워크 설계에서 일반적으로 사용하는 라우팅 정책은 최단거리 알고리즘을 이용하는 것이다. 즉 두 노드 간에 가장 짧은 거리의 패스(path)를 통해 패킷이 전송된다고 가정한다. 이때 거리의 척도로 지연시간 또는 단위 비용을 사용할 수도 있지만 물리적인 거리를 사용할 수도 있다. 본 연구에서는 두 노드 간의 물리적인 거리를 사용하여 최단거리 알고리즘에 의한 전송에 따라 각 라인 간의 통신량을 계산한다. 이를 이용하여 다음 조건에 따라 라인에 알맞은 라인 형태를 결정한다. 즉,  $f_e \leq c_b = c_e$ 인 경우에만  $x_{eb} = 1$ 이다.

### 2.2 신뢰성

통신 네트워크의 신뢰성을 위한 가장 일반적인 조건은 어느 두 노드 간에도 최소  $K(K \geq 2)$ 개의 서로 다른 패스가 존재하도록 하는 것이다. 이러한 패스는 에지가 서로 다른 패스(edge-disjoint path)와 노드가 서로 다른 패스(node-disjoint path)로 구분된다. 일반적인 것은 노드가 서로 다른 패스로 각 패스는 서로 다른 노드들을 포함하고 있는 것이다. 즉, 두 노드 간의 패스들에 이들 노드를 제외하고 어느 노드도 최대 한번 포함되는 것을 의미한다. 노드가 서로 다른 패스 조건이 에지가 서로 다른 패스 조건 보다 제한적이어서 신뢰성이 더 높은 네트워크를 가능케 한다. 예를 들어, 어느 두 노드 간에 노드가 서로 다른 패스가 2개 있는 경우 한 노드가 고장나도 다른 노드 간의 통신은 가능하다. 고장난 노드를 통과하지 않는 또 다른 패스가 항상 존재하기 때문이다. 그러나, 에지가 서로 다른 패스인 경우에는 한 노드의 고장으로 이 노드를 연결하는 모든 에지가 통신이 불가능하여 두 노드 간에 통신이 불가능할 수 있다.

본 연구에서는 어느 두 노드 간에도 최소  $K$ 개의 노드가 서로 다른 패스가 있도록 하는 K-연결성(K-connectivity)을 가정한다.

### 3. 시뮬레이티드 애닐링 알고리즘

시뮬레이티드 애닐링(simulated annealing : SA) 알고리즘은 열탕에서의 유리결정을 만드는 물리적 생성과정을 컴퓨터 상에서 모의 실험하는 것에서 유래한 휴리스틱 최적화 기법이다[9]. SA에 기초한 알고리즘은 현재해에서 다른 해로의 이동에 대한 선택을 랜덤으로 결정하므로써 부분 최적해(local minima)로부터 탈피하는데 목적을 둔다. 알고리즘의 각 반복에서 이동을 랜덤으로 선택하기 위하여 우선 비용의 변화를 계산한다. 만약, 해  $x$ 에서 해  $y$ 로의 이동을 고려하고 있고, 비용의 변화가 다음과 같다고 하자.

$$\Delta f(x, y) = f(y) - f(x)$$

그러면, 이동은 다음의 확률로 선택된다.

$$\exp(-\Delta f(x, y)/c)$$

이때  $c$ 는 온도이며 높은  $c$ 값에서는 채택확률이 거의 1에 가까워 이동이 선택될 확률은 커진다. 반면에 낮은  $c$ 값에서는 큰 향상을 가져오는 경우에만 채택된다. SA 알고리즘은 우선 높은  $c$ 값에서 시작하여 천천히 온도를 낮춘다. 이 과정을 냉각 스케줄(cooling schedule)이라 정의한다. 냉각 스케줄은 문제의 성격에 따라 달라지지만 일반적으로 사용하는 선형형태의 냉각 스케줄은 다음과 같다.

$$c_{k+1} = c_k \times (1 - \beta)$$

$$0 < \beta < 1$$

구체적인 SA 알고리즘은 다음과 같다.

• SA 알고리즘

단계 0 :  $k = 1, L(K), N$ 을 초기화

초기 해  $x$  결정, 가장 좋은 해  $z = x$

단계 1 : 다음 절차를  $L(K)$ 번 반복한다.

- 1) 후보해  $y$ 를 생성한다.
- 2) 만약,  $f(y) < f(x)$  이면  $x = y$  아니면 만약

$$\exp(-\Delta f(x, y)/c(k)) > \text{random}[0, 1] \text{이면}$$

$$x = y$$

3) 만약  $f(x) < f(z)$ 이면  $z = x$

단계 2 :  $k = k + 1$

만약  $k > N$ 이면 정지하고, 아니면 단계 1로 간다.

이 알고리즘에서 주어져야 할 중요한 파라미터 값은  $L(K), N, c(k)$ 이다. 이 값들은 문제 특성에 따라 결정되어야 한다. 이러한 파라미터 외에 고려하여야 할 것은 초기해와 후보해를 생성하는 방법이다.

#### 3.1 초기해 생성방법

패킷 통신 네트워크 설계를 위한 초기해로 제한 조건을 만족하는 임의의 해를 사용할 수 있다. 본 연구에서는 초기해를 용이하게 생성하기 위한 두가지 방법을 고려한다. 초기해를 구하기 위한 입력으로 요구되는 그래프  $G(V, E)$ 는 고려 대상이 되는 모든 노드를 포함하고, 어느 두 노드 간에도 에지가 있는 완전 그래프(complete graph)인 것으로 가정한다. 그러나, 어느 두 노드 간에 통신라인이 없어야 한다는 조건이 있다면 이에 해당하는 에지가 없는 그래프를 사용할 수 있다.

##### 3.1.1 최소결침나무에 기초한 초기해

우선 주어진 입력 네트워크에서 거리의 합을 최소로 하는 최소결침나무(minimal spanning tree : MST)를 구한다. 이 나무는 정의된 문제의 제한 조건을 만족하지 않을 수 있다. 따라서, 제한 조건을 만족시키기 위하여 추가적인 에지를 포함하여야 한다.

• MST에 기초한 초기해 생성 알고리즘

입력 :  $G(V, E)$  // 그래프

$d(i, j), i, j = 1, \dots, n$  // 노드 간 거리 행렬

$K$  :  $K$ -연결 계수

$T_0$  : 최대 지연시간

출력 : 초기해  $G'(V, E')$

처리 :

단계 1 :  $G$ 에서 최소 결침 나무  $G'$ 을 구한다.

단계 2: 다음 절차를 반복한다.

- 2-1)  $G$ 가  $K$ -연결성을 만족하지 않으면 단계 2-3)으로 간다.
- 2-2)  $G$ 로부터 구한 평균 지연시간이  $T_0$ 보다 작으면 단계 3)으로 간다.
- 2-3)  $G$ 에서  $Degree(v_{i1}) + Degree(v_{i2})$ 가 최소인 노드 쌍  $(V_{i1}, V_{i2})$ 을 구한다.
- 2-4) 두 노드 간의 거리  $d(V_{i1}, V_{i2})$  중 최소의 거리를 갖는 노드 쌍  $(V_{k1}, V_{k2})$ 를 구한다.
- 2-5)  $(V_{k1}, V_{k2})$ 를 연결하는 에지를  $G$ 에 추가한다.

단계 3:  $G$ 을 출력하고 정지한다.

위 알고리즘에서 최소결침나무는 Prim의 방법 [14]에 의해 용이하게 구할 수 있다. 또한, 그래프  $G$ 의  $K$ -연결성 조사는 그래프를 최대 흐름문제로 변형하는 방법을 이용하여 다음과 같이 수행할 수 있다[3].

•  $K$ -연결성 조사 알고리즘

입력:  $G(V, E), K$

출력: True/False

처리:

단계 1:  $G$ 를 다음과 같이  $G'$ 으로 변형한다.

- 1-1)  $G$ 의 각 노드  $v_i$ 를  $G'$ 의 두 노드  $V_{i1}, V_{i2}$ 로 대체한다.
- 1-2)  $G'$ 에 각 에지  $(V_{i1}, V_{i2})$ 를 추가한다.
- 1-3)  $G$ 의 각 에지  $(V_i, x)$ 를  $G'$ 의  $(V_{i1}, x_1), (V_{i2}, x_1), (V_{i1}, x_2), (V_{i2}, x_2)$ 의 4개 에지로 대체한다.

단계 2:  $G'$ 에서  $K(G')$ 을 구한다.

- 2-1) 최소 degree를 갖는 임의의 노드  $u$ 를 선택한다.
- 2-2)  $k_1 = \min\{k(u, v) \mid v \in V - \{u\}, v \text{는 } u \text{에 인접하지 않는다}\}$ .
- 2-3)  $k_2 = \min\{k(x, y) \mid x, y \text{는 } u \text{에 연결된 노드들이고, 서로 인접하고 있지 않다}\}$
- 2-4)  $K(G) = \min\{k_1, k_2\}$

단계 3:  $K(G) \geq K$ 이면 true를 리턴하고, 아니면 false를 리턴한다.

$k(u, v)$ 는 노드  $u$ 에서  $v$ 로의 최대 흐름(maximal flow)을 구하는 것이다. 이 때 네트워크의 각 에지에 대한 용량은 1로 한다. 최소 degree를 갖는 노드  $u$ 의 degree가  $d$ 라면 위의 알고리즘은 최대 흐름 알고리즘을  $O(n-d-1+d(d-1)/2)$ 번 부른다[3].

3.1.2 해밀토니안 서킷에 기초한 초기해

이 방법은 최소결침나무 대신에 최소의 거리를 갖는 해밀토니안 서킷(Hamiltonian circuit : HC)을 이용한다. 그러나, 최소 거리의 서킷을 찾는 문제는 외판원 문제(traveling salesman problem)로 NP-complete에 속한다. 본 연구에서는 간단한 경험적 방법에 속하는 가까운 이웃(nearest neighbor : NN)방법을 사용한다. 즉, 최소결침나무를 이용한 초기해를 구하는 알고리즘에서 단계 1에 NN 방법에 의해 해밀토니안 서킷  $G$ 을 구하고, 단계 2와 단계 3은 동일하게 정의하는 것이다.

주어진 네트워크에서 모든 노드를 한번씩 통과하는 해밀토니안 서킷은 각 노드에서 시계 방향과 반시계 방향의 두 패스가 존재하여 2-노드 연결성을 보장한다. 따라서,  $K$ 가 2일 경우 단계 2는 무의미하다.

3.2 후보해 생성방법

SA에서는 각 반복마다 현재해로부터 새로운 후보해를 생성하여야 한다. 네트워크 설계 문제에 SA를 적용한 Pierre[5]의 연구에서는 현재해의 두 에지를 선택하여 교환 연산을 적용하여 새로운 후보해를 구하는 방법을 사용하였다. 본 연구에서는 보다 다양한 연산 방법을 도입하여 각 연산의 효과를 측정하고자 한다. 연산 방법을 적용하기 위해서는 우선적으로 4개의 노드를 선택하여야 한다. 이를 위하여 다음과 같은 두 가지 규칙을 선정하였다.

- 노드 선택 : 네트워크에서 임의의 4개 노드를 선택한다.

- 에지 선택 : 현재해에서 두개의 에지를 선택하여 이 에지에 의해 연결된 4개의 서로 다른 노드를 결정한다.

위의 규칙에 의해 4개의 노드를 선택한 후 이들 노드를 연결하는  $m$ 개의 에지에 대해 다음과 같은 기본 연산을 적용할 수 있다.

(1) 제거(Delete)

한 에지를 제거하는 것으로  $m$ 개의 서로 다른 해를 생성한다.

(2) 1-에지 재위치(Relocate)

한 에지를 제거하고 새로운 하나의 에지를 추가하는 것으로  $m(6-m)$ 개의 서로 다른 해를 생성한다.

(3) 2-에지 재위치(Exchange)

두 에지를 제거하고, 새로운 두 에지를 추가하는 것으로  $mC_2 \times 6 - mC_2$ 개의 서로 다른 해를 생성한다.

이들 3개 기본 연산을 조합하여 다음과 같은 복합연산을 고려할 수 있다.

(4) 제거 + 1-에지 재위치(Delete + Relocate)

제거 연산과 1-에지 연산을 적용하는 것으로  $m + m(6-m)$ 개의 서로 다른 해를 생성한다.

(5) 제거 + 2-에지 재위치(Delete + Exchange)

제거 연산과 2-에지 재위치 연산을 적용하는 것으로  $m + mC_2 \times 6 - mC_2$ 개의 서로 다른 해가 존재한다.

(6) 1-에지 재위치 + 2-에지 재위치(Relocate + Exchange)

재위치 연산들을 적용하는 것으로  $m(6-m) + mC_2 \times 6 - mC_2$ 개의 서로 다른 해가 존재한다.

(7) 제거 + 1-에지 재위치 + 2-에지 재위치(Delete + Relocate + Exchange)

제거와 재위치 연산들을 적용하는 것으로  $m + m(6-m) + mC_2 \times 6 - mC_2$ 개의 서로 다른 해가 존재한다.

4개의 노드를 연결하는 에지의 수는 최대 6이다. 따라서, 각 연산이 적용될 때 생성되는 해의 수는 <표 1>과 같다.

<표 1> 각 연산에서 생성되는 해의 수

M	제 거	1-에지 재위치	2-에지 재위치	제거+ 1-에지 재위치	제거 + 2-에지 재위치	1-에지재위치 + 2-에지 재위치	제거+1-에지 재위치 + 2-에지 재위치
0	0	0	0	0	0	0	0
1	1	5	0	6	1	5	6
2	2	8	6	10	8	14	16
3	3	9	9	12	12	18	21
4	4	8	6	12	10	14	18
5	5	5	0	10	5	5	10
6	6	0	0	6	6	0	6
평균	3	5	3	8	6	8	11

SA 알고리즘의 각 반복에서 후보해를 생성하기 위하여 노드 또는 에지 선택 방법에 의해 4개의 노드를 선택한 후 현재해에서 이들을 연결하고 있는 에지들을 조회한다. 만약 연결된 에지가 없다면 어떤 연산도 적용할 수 없으므로 새로운 4개의 노드

를 다시 선택하여야 한다. 그렇지 않다면 주어진 연산을 적용하여 새로운 해를 구한다. 각 연산에서 발생하는 모든 대안에 해당하는 해 중 제한 조건을 만족하면서, 총 비용이 최소인 해를 후보해로 결정한다. 만약 모든 해가 제한 조건을 만족하지 못하면

새로운 4개의 노드를 다시 선택하여 위의 절차를 반복한다.

#### 4. 실험 및 분석

본 연구에서의 실험은 초기해 생성 방법과 후보해를 생성하는 방법에 대한 효과를 측정하기 위한 목적으로 수행되었다. 이전에 정의된 7가지 후보해 생성 연산 중 제거 연산만을 적용하면 실험의 초기에 더 이상 제거될 에지가 없는 상황이 발생하여 후보해를 더 이상 생성하지 못한다. 또한, 제거와 1-에지 재위치를 적용하는 경우에도 동일한 상황이 발생하였다. 따라서, 이들 연산을 제외한 나머지 5개 연산만을 실험 대상으로 정하였다. 따라서, 후보해를 생성하는 방법은 노드 선택과 에지 선택 방법에 대해 5가지 연산을 각각 적용하면 총 10개 조합이 생긴다. 여기에 초기해를 생성하는 두가지 방법을

포함하여 총 20개 조합에 대한 실험을 수행하였다. 노드 선택과 에지 선택은 난수에 의해 수행되므로 각 조합에 대해 5번의 반복(난수의 초기 시드를 바꾸어)으로 하여 결과의 신뢰성을 높였다.

실험은 임의의 20개 노드를 대상으로 하였다. 각 노드의 위치는 각 축에 대해 0 부터 500Km사이 일항분포에 따라 임의의 위치를 선정하여 각 노드 간의 거리를 구하였다. 네트워크 비용은 변동비만을 고려하여 <표 2>와 같이 거리와 용량에 따른 비용을 사용하였다. 그의 요구되는 파라미터 값은 <표 3>과 같다.

<표 4>는 실험 결과로 각 조합에서 도출된 해와 계산시간을 나타낸다. 실험은 펜티엄 4 컴퓨터에서 JAVA 언어로 구현하여 수행하였다. 초기해를 해밀토니안 서킷 방법으로 하고, 노드 선택 방법에 의한 제거, 1-에지 재위치, 2-에지 재위치 연산 방법을 적용한 결과가 평균 총비용 45,181천원으로 가장 우수한 해를 생성하였다.

<표 2> 네트워크 라인 비용

(위 : 천원)

BPS	~10Km	~30Km	~50Km	~100Km	~200Km	~300Km	~300Km	400Km~
2400	90.1	157.6	220	345.5	394.105	441.705	476.9	500.8
4800	117.1	204.8	286	451.7	512.3	574.2	619.9	651.6
9600	135.1	236.3	330	521.1	591.1	662.5	715.3	751.2
64000	270.3	472.6	659.9	1042.4	1182.3	1325.1	1430.7	1502.4
128000	286.6	505.7	706.3	1125.9	1379.3	1545.9	1669.1	1752.8
192000	368.5	650.2	908.1	1147.6	1773.4	1987.6	2146	2253.6
256000	491.4	867	1210.8	1930.2	2364.6	2650.2	2861.4	3004.8
384000	573.3	1011.5	1412.6	2251.9	2758.7	3091.9	3338.3	3505.6
448000	614.2	1983.7	1513.5	2412.7	2955.7	3312.7	3576.7	3756
512000	696.1	1228.2	1715.3	2734.4	3349.8	3754.4	4053.6	4256.8
768000	819	1445	2018	3217	3941	4471	4769	5008
1024000	923.8	1630	2276.3	3628.8	4445.4	4982.4	5379.4	5649
1544000	1154.8	2037.5	2845.4	4536	5556.8	6228	6724.399	7061.3
2048000	1539.7	2716.6	3793.8	6048	7409.1	8304	8965.7	9415
4500000	11561.1	20388.6	28469.8	45376.6	55571.9	62285.3	67258.9	70614.7
15500000	23122.2	40777.2	56939.6	90753.2	111143.8	124570.6	134517.8	141229.4

〈표 3〉 파라미터 값

파라미터	값	설 명
$N$	3,000	반복수
$L(K)$	1(모든 $k$ 에 대해)	부분 반복수
$c(1)$	100,000	초기온도
$\beta$	0.015	냉각확률
$T_0$	0.05	최대지연시간
$K$	3	$K$ -연결성계수

[그림 1]과 [그림 2]는 각 조합에서 5번의 반복 수행 결과에 대한 평균을 도식화한 것이다.  $x$ 축의 기호는 후보해 생성 연산방법을 의미하여 R은 1-에지 채워치, E는 2-에지 채워치, D는 에지 제거를 의미한다. [그림 1]은 계산시간 면에서 노드/에지 선택 방법과 연산 간에는 차이가 있지만 초기해 생성 방법 간에는 큰 차이가 없음을 나타낸다.

[그림 2]는 총비용 면에서 초기해 생성방법과 노

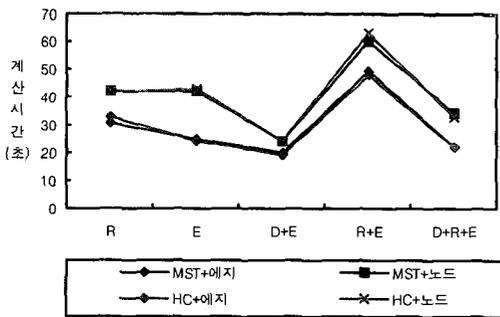
〈표 4〉 실험 결과

(단위 : 총비용(천원) 시간(초))

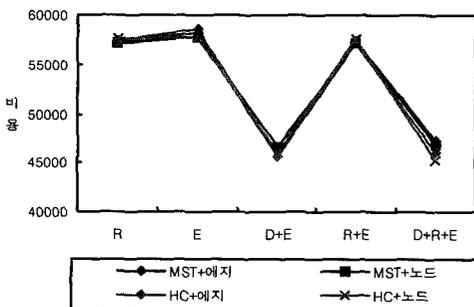
	초기해(MST)				초기해(HC)			
	에지 선택		노드 선택		에지 선택		노드 선택	
연산	총비용	시간	총비용	시간	총비용	시간	총비용	시간
1-에지 채워치	56625	32	57292	43	57171	32	57742	42
	56741	32	56813	41	58150	32	57380	41
	57884	30	56788	40	57758	38	57493	44
	56864	31	57452	41	56670	30	58066	42
	58421	28	57714	44	57308	33	57233	41
평균	57307	31	57212	42	57411	33	57583	42
2-에지 채워치	58706	25	58282	41	58791	25	57918	42
	57591	23	57550	41	59481	25	57832	43
	58403	25	57574	42	57876	23	57440	44
	57845	26	58067	42	57981	23	58132	42
	58652	25	57670	43	58541	26	57866	42
평균	58239	25	57829	42	58534	24	57838	43
제거 + 2-에지 채워치	45038	23	44950	23	47658	19	46110	25
	46494	19	46031	24	45046	19	46278	24
	46052	18	48668	24	48529	18	46869	24
	45749	19	46813	23	43431	19	45479	24
	45123	19	46764	24	43880	18	45356	24
평균	45691	20	46645	24	45709	19	46018	24
1-에지 채워치+ 2-에지 채워치	57450	52	56960	60	57258	49	57067	59
	56820	50	56711	61	57287	45	57883	65
	57201	45	57217	62	57480	49	57070	64
	57732	51	56897	59	56344	50	58662	62
	57606	45	57794	60	57831	45	57176	63
평균	57362	49	57116	60	57240	48	57572	63
제거+1-에지 채워치+2-에지 채워치	50185	20	46239	32	45658	21	43694	33
	49702	21	46778	35	45493	20	45285	32
	45954	21	46163	34	46751	21	44100	34
	44175	20	46881	35	45862	21	50447	31
	46356	28	45882	34	46654	28	42381	36
평균	47274	22	46389	34	46084	22	45181	33



드/에지 선택 방법에는 차이가 없으나, 후보해 연산 간에는 차이가 있음을 나타낸다. [그림 2]의 결과에 부가하여 총비용면에서의 차이를 보다 객관적이고, 정량적인 분석을 하기하기 위하여 분산 분석을 수행하였다. <표 5>는 2가지 초기해 생성방법, 2가지 노드/에지 선택방법, 5가지 후보해 연산을 주 요인으로 하고, 요인 간 교호작용을 고려한 분산분석 결과를 나타낸다. 분석은 각 조합에서의 반복을 5번 하였으므로 총 100개의 표본을 대상으로 하였다. 세 가지 주 요인 중 후보해 생성 연산 만이 1% 유의 수준에서 총 비용에 영향을 주고, 나머지 요인은 큰 영향이 없음을 알 수 있다. 또한, 요인 간의 교호작용도 통계적으로 유의하지 않음을 보여준다. 따라서, 후보해 연산이 우수한 해를 생성하는데 매우 중요한 역할을 한다는 것을 의미한다.



[그림 1] 평균 계산시간



[그림 2] 평균 총비용

지금까지의 실험 결과는 초기해 생성 방법이 총비용과 계산시간 측면에서 큰 차이를 보이지 않음

을 나타낸다. 또한, 노드/에지 선택 방법은 총비용에 차이가 없지만 계산시간 측면에서 큰 차이를 보인다. 따라서, 현재의 해에서 에지를 선택하는 방법이 4개 노드를 선택하는 방법 보다 효율적임을 알 수 있다.

[그림 2]와 <표 5>의 실험결과는 후보해를 생성하는 연산 중 제거 연산을 포함하는 것이 보다 우수한 해를 생성함을 나타낸다. 이는 제거 연산을 통하여 보다 적은 수의 에지를 해에 포함시켜 불필요한 에지가 없도록 하는데 기인한다. 최소걸침나무나 해밀토니안 서킷에 기초한 초기해는 K-연결성 조건을 만족시키기 위하여 많은 수의 에지를 포함하고 있다. 예를 들어, <표 4>의 실험 중 해밀토니안 서킷 방법을 적용한 모든 초기해는 50개의 에지를 포함하고 있다. 그러나, 제거, 1-에지 재위치, 2-에지 재위치 연산을 적용한 결과의 한 해는 30개의 에지를 포함하여 20개의 에지를 제거시킴을 알 수 있다.

불필요한 에지를 제거한 결과의 또 다른 효과는 계산시간이 감소한다는 것이다. 에지 선택 방법에서 2-에지 재위치 연산 만을 적용한 경우 평균 계산시간은 24.5초 였으나, 2-에지 재위치와 제거 연산을 적용한 결과의 평균 계산시간은 19.5초로 5초가 단축되었다. 이 결과는 <표 1>의 해의 대안수와는 반대되는 현상이다. <표 1>에 따르면 2-에지 재위치 만을 적용한 것에 비해 2-에지 재위치와 제거를 적용한 연산이 보다 많은 대안의 해를 조사한다. 고려하는 대안이 많으므로 더 많은 계산시간이 걸려야 할 것이다. 그러나, 계산 시간의 가장 많은 부분을 차지하는 것은 K-연결성을 조사하는 알고리즘으로 계산시간은 최대 흐름 알고리즘을 부른 횟수에 따라 증가한다. 주어진 네트워크에서 최소 degree를 갖는 노드의 degree가  $d$ 라면 최대 흐름 알고리즘을  $O(n-d-1+d(d-1)/2)$ 번 부른다. 따라서, 최소 degree에 따라 계산시간은 증가한다. 해에 에지 수가 적다면 최소 degree는 감소하고, 최대 흐름 알고리즘을 부르는 횟수 역시 감소하여 계산시간이 적게 든다.

〈표 5〉 분산 분석

변 동 요 인	계 곱 합	자 유 도	평균계 곱 합	$F_0$
초기해	896998	1	896998	0.644
노드/에지 선택	540078	1	540078	0.388
연 산	3170904485	4	79276121	569.027*
초기해×선택	2611	1	2611	0.002
초기해×연산	7292080	4	1823020	1.309
선택×연산	7000740	4	1750185	1.256
초기해×선택×연산	1124620	4	281155	0.202
오 차	111449986	80	1393125	
총합계	3299211598	99		

주) \* 1% 유의수준에서 유의.

## 5. 결 론

패킷 통신 네트워크의 토폴로지를 설계하는 문제는 NP-complete에 속하여 최적해를 제한된 시간 내에 구할 수 없는 어려운 문제이다. 시뮬레이티드 애닐링 알고리즘은 짧은 시간 내에 근사 최적해를 구할 수 있는 우수한 방법 중의 하나로 네트워크 설계 문제를 해결하는 유용한 도구이다. 본 연구에서는 시뮬레이티드 애닐링 알고리즘을 적용할 때 중요한 요소인 초기해와 후보해를 결정하는 방법에 대한 분석을 수행하였다.

실험 결과 최소결집나무에 기초한 초기해 생성 방법과 해밀토니안 서킷에 기초한 초기해 생성 방법 간에는 성능 면에서 큰 차이가 없음을 알 수 있었다. 또한, 후보해를 생성하기 위해 필요한 두가지 선택 방법인 노드 선택과 에지 선택은 총비용 면에서 차이가 없지만 계산시간에서 차이를 보여 에지 선택 방법이 보다 효율적임을 알 수 있었다. 총비용과 계산시간에서 가장 큰 영향을 주는 것은 후보해를 생성하는 연산이다. 5가지 연산을 비교한 결과 현재해에서 에지를 제거하는 연산을 포함한 방법이 총비용 면에서 우수한 해를 가져왔다. 이는 현재해에 포함된 불필요한 에지를 효과적으로 제거하여 비용을 감소시키는 역할을 하기 때문이다. 더욱이 에지의 수를 적게함으로써 계산시간도 함께 감소하였다.

본 연구는 초기해와 후보해 생성 방법들 간의 효과를 분석하였으나, 냉각 스케줄 방법 또한 시뮬레이티드 알고리즘의 성능에서 매우 중요한 역할을 한다. 앞으로 이에 대한 연구를 지속할 예정이다.

## 참 고 문 헌

- [1] Clementi, A. and Di Ianni, M. "On the Hardness of Approximating Optimum Schedule Problems in Store and Forward Networks," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, Vol.4, No.2(1996), pp.272-280.
- [2] Elbaum, R. and Sidi, M., "Topological Design of Local Area Networks using Genetic Algorithms, in *Proceedings of Infocom 95*, IEEE Press : Los Alamitos, CA, (1995), pp. 64-71.
- [3] Esfahanian, A.H. and Hakimi, S.L., *On Computing the Connectivities of Graph and Digraph, Networks*, 1984, pp.355-366.
- [4] Gavish, B. "Topological Design of Computer Communication Networks. The Overall Design Problem," *European Journal of Operational Research*, 58(1992), pp.149-172.
- [5] Gerla, M., Frank, H., Chou, W. and Eckl, J.

- "A Cut Saturation Algorithm for Topological Design of Packet Switched Communication Networks," in *Proceedings of the IEEE National Telecommunications Conference*, (1974), pp.1074-1085.
- [6] Grover, G., Kershenbaum, A. and Kermani, P., "MENTOR : An Algorithm for Mesh Network Topological Optimization and Routing," *IEEE Transactions on Communication*, 39(1991), pp.503-513.
- [7] Kershenbaum, A. *Telecommunications Network Design Algorithms*, McGraw-Hill, New York, 1993.
- [8] King-Tim, K., Kit-Sang, T., Cheung-Yan, C., Kim-Fung, M. and Kwong, S., "Using Genetic Algorithms to Design Mesh Networks," *IEEE Computer*, Vol.30, No.8(1997), pp.56-61.
- [9] Kirkpatrick, S., C.D. Gelatt Jr., and M.P. Vecchi, "Optimization by simulated annealing," *Science*, Vol.220(1980), pp.671-680.
- [10] Kleinrock, L., *Communication Nets : Stochastic Message Flow and Delay*, McGraw-Hill : New York, 1964.
- [11] Maruyama, K., "Designing Reliable Packet Switched Communication Networks," *Proceedings of the IEEE ICC*, (1978), pp. 493-498.
- [12] Pierre S, Hyppolite, M, Bourjolly, J. and Dioume, O., "Topological Design of Computer Communication Networks Using Simulated Annealing," *Engineering Applications in Artificial Intelligence*, Vol.8, No.1 (1995), pp.61-69.
- [13] Pierre, S. and Legault, G., "An Evolutionary Approach for Configuring Economical Packet Switched Computer Networks," *Artificial Intelligence in Engineering*, 10(1996), pp. 127-134.
- [14] Prim, R.C., *Shortest Connection Networks and Some Generalization*, Bell System Tech. J., 36(1957), pp.1389-1401.
- [15] Steiglitz, K., Weiner, P. and Kleitman, D.J., "The Design of Minimum Cost Survivable Networks," *IEEE Transactions on Circuit Theory*, Vol.16, No.4(1969), pp.455-460.