

# Longest Shortcut을 이용한 홉 제한이 있는 생존 가능망 설계

곽선정 · 한치근<sup>†</sup>

경희대학교 전자정보학부

## Survivable Network Design with Hop Limit Using Longest Shortcut Method

Sun-Jung, Kwack · Chi-Geun, Han

College of Electronics & Information, Kyunghee University, Yongin, 449-701

For the recent multimedia service, the network should be fast, stable, and reliable. In order to provide reliability of the network, certain survivability of the network, which guarantees it's functions even though there is some failure on the network, should be satisfied. Also, for a pair of nodes on the network, there must be paths of which numbers of hops are within a certain limit for realtime service between them. In this paper, we propose a longest shortcut method for solving the survivable network design problems with hop limit. Through the computational results, we compare the efficiency of the method with an existing shortest shortcut method and find that the proposed method is more efficient than the shortest shortcut method.

**Keywords:** survivable Network, Hop, local search

### 1. 서론

최근의 컴퓨터의 대대적인 보급과 산업의 발달로 인하여 네트워크상의 서비스들도 각종 멀티미디어 정보를 다루게 되었다. 그리고 이러한 멀티미디어 서비스를 원활하게 제공하기 위해서 큰 대역폭을 필요로 하게 되어 통신망은 점점 고속화 광대역화 되고 있으며 광섬유는 이러한 통신망의 특징에 적당한 것으로 잘 알려져 있다.

그러나 광섬유를 이용한 광통신망은 설치비용이 높기 때문에 종래의 메쉬구조보다는 연결된 에지의 수를 줄이는 방향으로 설계해야 한다. 그리고 망의 신뢰성을 보장하기 위해서는 망의 일부분에 장애가 발생하더라도 전체 망의 운영에는 지장이 없는 생존도가 고려된 망의 설계가 요구된다(Cardwell and Monma, 1989; Goemans and Bertsimas, 1993; Monma and Shallcross, 1989; Steiglitz, Weiner, 1969).

멀티미디어 데이터는 데이터의 양이 많을 뿐 아니라 실시간

서비스를 요구하기도 한다. 이러한 실시간 서비스를 위해 통신망 설계에서는 시간 지연이 중요하게 고려된다. 시간 지연, 빠른 복구 경로 설정, 망의 효율적인 사용 등을 위해서는 통신망의 홉 제한 조건이 필요하게 된다(Chan, *et al.*, 1998; Herzberg, *et al.*, 1995). 망의 지연은 노드에서의 Queueing 지연, 통신경로의 설정에 필요한 시간 등에 의해 발생한다.

생존망에 관한 내용은 오래 전부터 연구되어 왔고 많은 방법론이 제기되어 왔지만, 생존망에 홉 제한 방법에 대해서는 많은 연구가 진행되지 않았었다(Herzberg and Bye, 1994).

이러한 홉 제한을 갖는 생존 가능망 설계문제(SNDPH: Survivable Network Design Problems(SNDP) with Hop Limits)는 NP-Complete 문제로 알려져 있다(Garey and Johnson, 1979).

SNDPH는 망의 생존도 조건과 홉 제한 조건을 모두 만족하는 통신망을 찾는 문제이다.

본 논문에서는 홉 제한을 갖는 생존 가능망을 설계하기 위하여 생존 가능망 설계를 위해 기존에 연구되어 있는 국부 탐

<sup>†</sup> 연락저자: 한치근 교수, 449-701 경기도 용인시 기흥읍 서천리 1 경희대학교 전자정보공학부, Fax: 031-202-1723, e-mail: cghan@khu.ac.kr  
2001년 3월 접수, 2회 수정 후 2002년 4월 게재 확정.

색 방법을 이용한 휴리스틱 방법을 사용하였다. 이 방법은 먼저 생존도 조건을 만족하는 망을 설계한 후에 흡 제한이 만족되는지를 확인한다. 흡 제한이 만족되지 않으면, 생존도 조건을 유지한 상태에서 가장 많이 흡 수를 줄일 수 있는 에지(Longest Shortcut: LS)를 추가하는 방법으로 시작한다. 이후 흡 제한을 만족하는 조건에서 흡 수를 하나씩 늘리는 에지를 추가하는 방법을 사용하는데, 가능한 에지가 다수일 때 이 중 가장 최소 비용의 에지를 선택하는 방법을 사용한다.

본 논문은 2장에서 생존 가능망과 흡 제한의 구체적인 내용과 기존의 연구 내용에 대하여 알아보고, 3장에서는 통신망의 흡 제한을 위해 본 논문에서 제안한 LS 방법에 대해 설명한다. 그리고 4장에서는 흡 제한이 있는 생존 가능망의 설계 방법과 과정에 대해 설명하고, 5장에서는 기존의 연구 방법과 제안한 방법으로 실제적인 통신망을 구축할 때 구축비용이 통신망의 환경에 따라 어떻게 달라지는지 비교하는 실험계산과 실험계산의 결과를 분석하여 기술한다. 마지막으로 6장에서 결론 및 추후연구 방향에 대해서 기술한다.

## 2. 흡 제한이 있는 생존 가능망

### 2.1 생존 가능망

망의 생존도 관점은 노드 독립 경로(Node-disjoint path) 문제와 에지 독립 경로(Edge-disjoint path) 문제로 나눌 수 있다. 노드 독립 경로란 같은 노드를 공유하지 않는 서로 다른 경로를 말하는 것이고, 에지 독립 경로라는 것은 같은 에지를 공유하지 않는 경로를 말하는 것이다. 그러므로 노드 독립 경로이면 에지 독립 경로이고 그 역은 성립하지 않음을 알 수 있다. 본 논문에서는 노드 독립 경로만을 고려하도록 한다.

<그림 1>을 보면 노드 A에서 H 사이에는 A-B-H, A-D-E-G-H(혹은 A-C-E-F-H)의 노드가 겹치지 않는 경로가 존재한다. 그리고 A-B-H, A-C-E-G-H, A-D-E-F-H의 에지가 겹치지 않는 경로가 존재한다. 즉 노드 독립 경로는 2개, 에지 독립 경로는 3개 존재함을 알 수 있다.

통신망에서 임의의 노드  $i, j$  사이에  $k$ 개의 노드 독립 경로가 존재할 경우 생존도  $k$ 를 갖는 생존 가능망이라고 한다.

생존 가능망의 설계를 위한 기존의 연구 방법으로 Steiglitz,

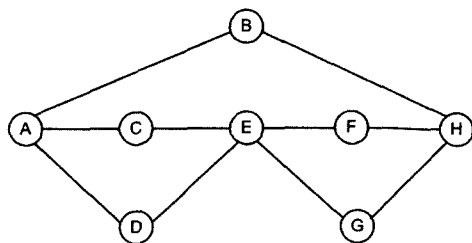


그림 1. 생존 가능망에 관한 예.

Weiner and Kleitman(1969)은 생존 가능망을 설계하기 위한 국부탐색방법을 제시하면서 X-변환의 기법을 제안하였다(Steiglitz and Weiner, 1969). Monma and Shallcross(1989)는 생존도 조건이 모두 2인 경우의 문제에 대해 해결 방안을 제시하였으나 일반적인 생존도에 대한 해법은 제시하지 못하였다(Monma and Shallcross, 1989). 이어서 Grötschel and Monma(1990)는 정수계획법을 이용한 해결방법을 제시하였다(Grötschel and Monma, 1990). 그리고 Goemans and Bertsimas(1993)는 선형계획법을 이용하여 문제를 해결할 수 있다고 하였다(Goemans and Bertsimas, 1993). 하지만 정수계획법이나 선형계획법은 최적해를 구할 수 있는 장점이 있지만, 노드의 수가 증가함에 따라 제한식의 개수가 폭발적으로 증가하여 많은 노드가 있는 경우 현실적으로 해를 얻기 어려운 문제점을 갖고 있다.

따라서 본 논문에서는 Steiglitz, Weiner and Kleitman(1969)이 제안한 국부 탐색 방법을 이용한 휴리스틱 방법을 기반으로 하여 생존 가능망을 설계하는 방법을 사용하였다.

노드 간의 거리를 고려하지 않고 흡 제한이 있는 노드 독립 경로를 구하는 방법으로 Oki and Yamanka는 연결도를 나타내는 행렬을 곱하는 방법을 제안하였다(Oki and Yamanka, 1995). 생존가능망의 설계와 wavelength 할당의 문제를 동시에 고려한 연구(Modiano and Narula-Tam, 2001)와 점차 경계가 불투명해지고 있는 현대의 네트워크의 생존가능성을 agent 방법을 사용하여 확인하는 방법을 제시하고 있는 연구가 최근 진행되었다(Perraju, 1999).

본 논문에서는 유클리디언 거리(Euclidean Distance)를 갖는 망을 고려하기로 한다.

### 2.2 흡 제한 방법

임의의 망에서 어떤 노드  $i$ 와  $j$  사이의 경로에서  $i$ 와  $j$ 를 제외한 나머지 노드들을 흡이라 한다. 이런 흡의 개수에 의해서 경로상의 시간 지연이 결정되기 때문에 실시간 서비스를 위한 망의 설계시 중요하게 고려되어야 한다. 그리고, 흡의 수가 많을수록 망 고장시 망의 복구 알고리즘이 복잡해지므로 흡 수를 줄여 망 복구 시간을 줄일 수 있다.

흡 제한을 위한 기존의 연구방법에는 어떤 노드와 그 노드에서 하나를 건너뛴 노드 사이의 연결을 고려한 Shortest Shortcut(SS) 방법이 있다(Jun and Han, 1999).

<그림 2>에서 노드 S와 T 사이의 흡 수는 4이다(실선 에지만 고려). 이때 흡 제한이 2라면 흡 수를 2개 줄여야 한다. 따라

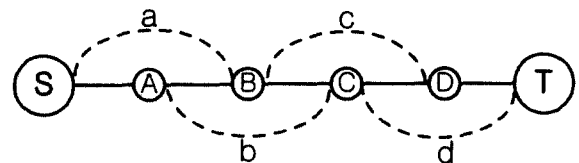


그림 2. 흡 제한에 관한 예.

서 SS를 이용한다면 예지 a, b, c, d 중 일단 하나의 예지를 추가하고, 다른 노드와의 연결에 지장을 주지 않는다면 그 중간의 노드를 없앤다. 그리고 또 다시 구성된 망에서 위와 같은 일은 반복하여 홑을 줄인다.

이와 같은 방법은 구현이 간단하지만 한 번에 하나의 홑만을 줄이는 것을 고려하고 있다. 따라서 이 방법은 기존 홑 개수에서 홑 제한을 뺀 만큼 예지가 추가될 수 있기 때문에, 망이 방대하고 홑의 제한이 작은 경우에는 적합하지 않다.

### 3. Longest Shortcut(LS)을 이용한 홑 제한 방법

본 논문에서는 홑 제한을 만족시키기 위해 Longest Shortcut(LS) 방법을 이용하였다. LS 방법이란 최대로 줄일 수 있는 홑 수부터 줄여야 할 홑 수까지를 고려하는 것으로 아래의 <그림 3>과 같은 망을 예로 들어본다.

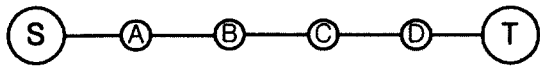


그림 3. LS를 적용할 망.

<그림 3>에서 S에서 T까지의 홑 수는 4이다. 이 때 홑 제한이 2라면 S에서 T까지의 홑 수는 2 이하가 되어야 한다. 그러므로 LS 방법을 적용하면 다음과 같이 3가지 경우가 발생한다.

첫 번째로 <그림 4>와 같이 S에서 T까지 새로운 예지 a를 생성하면 기존의 홑인 A, B, C, D를 줄일 수 있다.

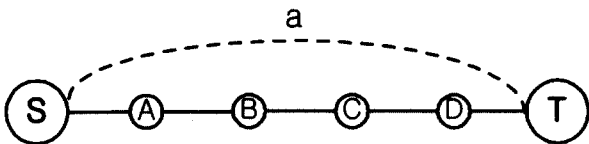


그림 4. 줄일 수 있는 홑 수가 4인 경우.

두 번째로 <그림 5>와 같이 새로운 예지 b나 b'를 생성하면 줄일 수 있는 홑의 개수가 3이 된다. 따라서 S에서 T 사이의 홑 수가 1이 된다.

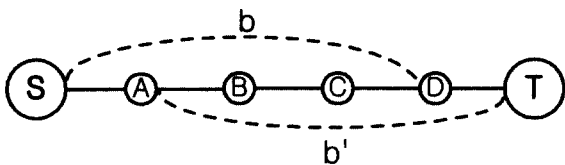


그림 5. 줄일 수 있는 홑 수가 3인 경우.

세 번째로 <그림 6>과 같이 새로운 예지 c, c' 혹은 c''를 생성하면 줄일 수 있는 홑의 개수가 2가 된다. 따라서 S에서 T 사이의 홑 수는 2가 된다.

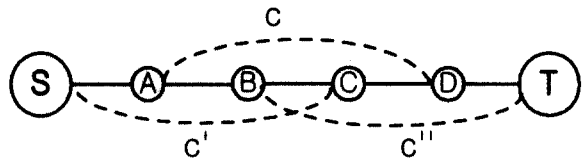


그림 6. 줄일 수 있는 홑 수가 2인 경우.

본 논문에서는 Shortcut이 단 하나의 예지로만 구성되는 경우를 고려하기로 한다. 예를 들어 3개의 홑을 줄일 경우 연속적으로 있는 노드 3개를 줄이는 것을 고려하고 노드 2개와 1개가 서로 연속적이지 않은 경우는 고려하지 않기로 한다.

각각의 단계에서 구해진 추가 가능한 예지들 중 가장 비용이 적게 드는 것을 선택하여 추가하면 홑 제한을 만족하는 망이 되며, 추가된 예지 사이의 노드가 삭제되어도 망의 생존도가 만족된다면 그 노드들을 제거할 수 있다.

이러한 LS 방법은 통신망 상의 노드 사이의 각이 작은 경우 더 효과적인데, 그것은 다음의 <그림 7>과 같이 노드의 분포가 넓게 분산되어 있는 망의 예를 보면 알 수 있다. <그림 7>은 전체 망의 일부분만을 그린 것이라고 가정하고, 망의 비용은 예지의 길이에 비례한다고 가정하자.

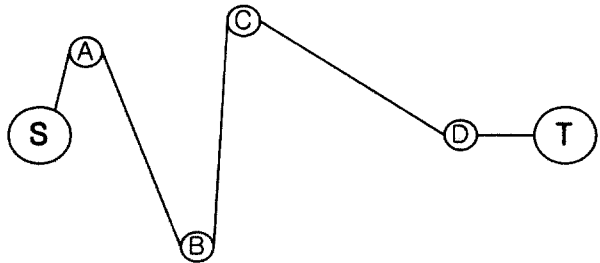


그림 7. SS와 LS를 적용하기 위한 망.

<그림 7>의 망에서 홑 제한이 2라면 현재 S와 T 사이의 홑의 수가 4이므로 두 개의 홑을 줄여야 하며, 즉 기존의 SS 방법을 사용한다면 두 개의 예지가 추가되어야 한다. 순차적으로 A-C 예지가 추가되어 홑수를 1개 줄이고, 이후 S-A-C-D-T에서 S-C의 새로운 예지가 추가되어 S-T 사이의 홑은 2가 된다. <그림 8>은 결과를 나타내고 있다.

그러나 같은 망 <그림 7>에 LS를 적용한다면 다음 <그림 9>의 예지 a, b, b', c, c', c''를 고려해야 한다.

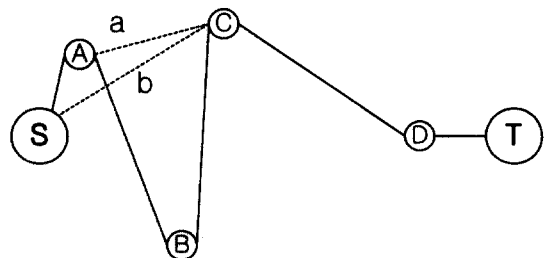


그림 8. SS를 적용한 망.

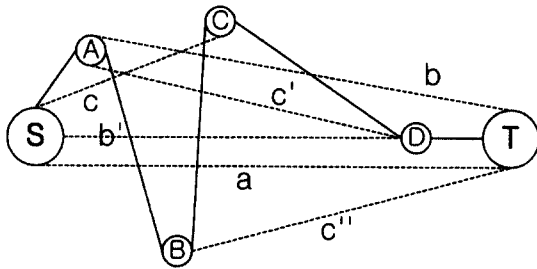


그림 9. LS를 위한 가능한 모든 에지.

<그림 9>에서는 에지  $c$ 가 가장 짧으므로 <그림 7>의 망에 LS를 이용해 흡 제한을 만족시킨다면 에지  $c$ 가 추가된 <그림 10>과 같은 망이 생성된다.

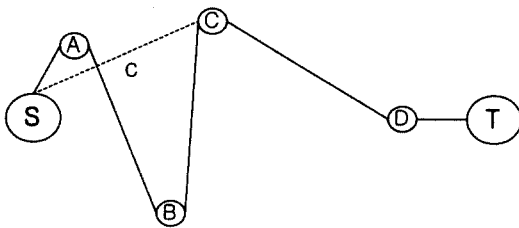


그림 10. LS를 적용한 망.

<그림 7>에 SS를 적용하였을 때는 <그림 8>의  $a, b$ 가 추가되었고, LS를 적용하였을 때는 <그림 10>의  $c$ 가 추가되었다. 에지 (S, A), (A, B), (B, C)가 망의 다른 노드 쌍의 생존도를 만족시키기 위해 계속해서 사용된다고 가정하자. 그러면 위 예에서  $cost(a)+cost(b) > cost(c)$ 이므로 이러한 망의 경우에는 총비용면에서 LS 방법이 더 경제적임을 알 수 있다.

그러므로 LS를 사용한 흡 제한 방식의 경우에는 줄여야될 흡의 개수가 클 때 여러 개의 흡을 한꺼번에 고려함으로써, 보다 적은 수의 에지를 추가하거나 한꺼번에 많은 수의 흡을 줄임으로써 망의 구축비용을 줄일 수 있다.

#### 4. 흡 제한이 있는 생존 가능망 설계

본 논문에서는 흡 제한이 있는 생존 가능망 설계를 위해 <그림 11>과 같은 단계를 거친다. 모든 단계에서 항상 생존도가 만족되어야 한다.

##### 4.1 초기해 선정

초기해는 Steiglitz, *et al.*이 제안한 방법을 사용하였는데, 이 방법은 어떤 노드  $i$ 와 다른 모든 노드 사이의 최고 노드 연결 요구도 만큼 에지 개수를 확보해 주는 것이다(Steiglitz and Weiner, 1969). 예를 들면, 노드  $i$ 가 다른 특정 노드  $j$ 와 3의 연결도를 요구할 때는 노드  $i$ 에 최소한 3개의 에지를 확보해 주는

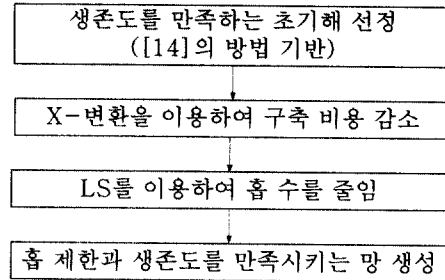


그림 11. 흡 제한을 만족하는 생존 가능망 설계방법의 흐름도.

방법이다. 이 방법을 모든 노드에 적용하면 생존도를 만족할 수 있는 하나의 망을 설계할 수 있다. 초기해를 구한 후에는 Ford-Fulkerson 방법을 사용하여 Maxflow 문제의 해를 구해 생존도를 만족하는지 확인한다. 다양한 값을 얻기 위해 임의의 값으로 여러 개의 초기해를 구한다.

##### 4.2 국부 변환

구해진 초기해의 국부 변환시 사용하는 방법은 X-변환(X-Change)이다. X-변환의 개념은 <그림 12>에 설명되어 있다. 구축된 망에서 에지  $a$ 와  $b$ 가 연결되어 있을 때, 만약  $cost(a) + cost(b) > cost(a') + cost(b')$  이고, 생존도 또한 만족한다면 에지를  $a \rightarrow a', b \rightarrow b'$ 로 바꾸어 전체 비용을 감소시킨다(Steiglitz and Weiner, 1969).

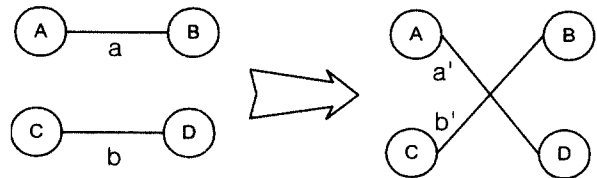


그림 12. X-변환의 적용 예.

그러나, 여기서 전체 노드들 간의 생존도가 만족하는지 확인해 보아야 한다. 나머지 노드들 간의 생존도 확인 절차의 자세한 사항은 Steiglitz and Weiner(1969)에서 발견할 수 있다.

##### 4.3 LS를 이용하여 흡 수를 줄이는 방법

X-변환을 이용하여 초기해의 비용을 최소로 만든 후 LS 방법을 이용해 흡 제한을 만족시킨다. LS 방법은 통신망 상의 노드 사이의 각이 직선이 아닌 이상, 짧은 에지 여러 개를 추가하는 것보다 적은 수의 긴 에지를 추가하는 것이 망의 구축비용이 적게 든다는 발상으로 제시된 방법으로써 다음의 <그림 13>과 같은 순서를 가진다.

추가되는 에지는 모든 가능한 경우에 대하여 최소비용이 되는 에지를 선택하게 된다. 모든 가능한 에지의 수는 두 노드 간의 흡 제한수가  $h$  인 경우  $1+2+\dots+(h+1) = \frac{(h+1)(h+2)}{2}$  가

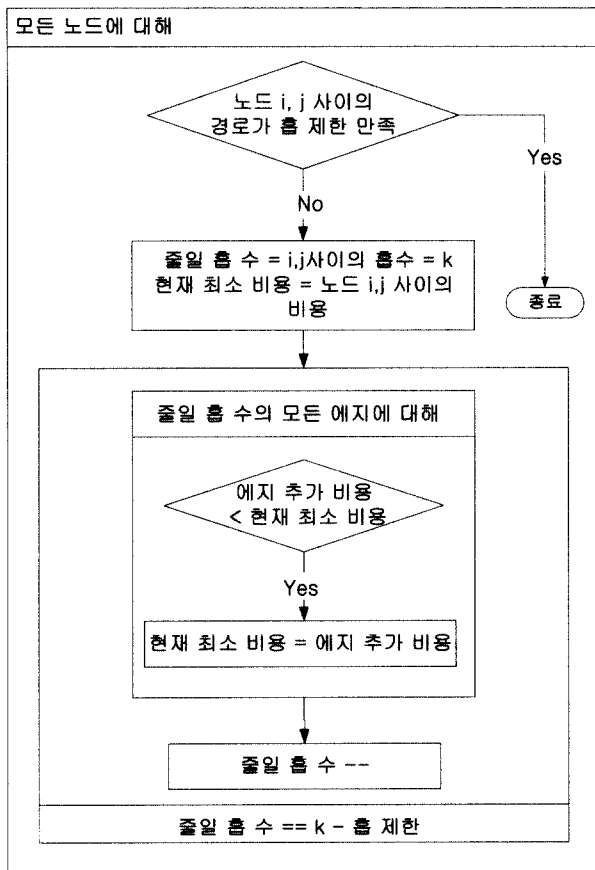


그림 13. LS 방법 순서도.

된다. 이는 본 논문에서 하나의 에지로만 Shortcut을 구성하는 경우만 고려하기 때문으로,  $h$ 가 크지 않다면 짧은 시간에 모든 경우를 확인할 수 있다.

두 노드 간의 생존도를 알기 위해서는 Ford-Fulkerson 방법을 사용한다. 노드에 용량을 1을 할당하여 Maxflow를 구하면 그 Maxflow 값은 두 노드 간의 노드 독립 경로수를 나타내며 요구하는 생존도와 비교하여 생존도보다 크면 그 경로는 생존도를 만족하는 것이 된다.

## 5. 실험계산 및 결과 분석

### 5.1 실험계산을 위한 설정

실험계산은 노드와 흡 제한 수, 좌표의 범위를 변화시켜 가면서 수행하였다. 전체 노드의 좌표는 무작위로 생성하였고, 망의 형태를 변화시킬 때를 제외하고 모든 결과에서 좌표의 범위는 X좌표는 0-1,000, Y좌표는 0-1,000의 값을 선택하였다. IBM-PC Pentium-II 400 Windows 2000 Professional 하에서 수행하였다. <표 1>은 LS를 적용한 결과이다. 그리고 실험 결과 값 중 흡 제한 방법을 적용하면 초기해에 비해 비용이 항상 늘

표 1. 노드 수가 다른 망의 LS 적용 결과

그래프	노드 수 15			노드 수 25			노드 수 45		
	초기 비용	비용	추가 에지 수	초기 비용	비용	추가 에지 수	초기 비용	비용	추가 에지 수
1	11143	11770	1	16710	17152	2	34482	36453	4
2	9751	9910	1	17603	18307	2	35674	36921	4
3	11216	11535	1	17946	18801	2	33885	35577	4
4	13305	13647	1	18215	19008	2	33406	34377	4
5	12873	13014	1	18375	19097	2	33629	34840	4
6	9888	10342	1	18462	19238	2	34420	35520	4
7	9807	10281	1	18480	19316	2	32401	33639	4
8	10500	10795	1	18487	19463	2	33319	35358	4
9	11759	11897	1	19269	20062	2	38803	40052	4
10	11336	11642	1	19557	20149	2	35630	37010	4
11	9961	10314	1	19636	20188	2	41957	43643	4
12	10032	10221	1	20109	20470	2	36511	37747	4
13	11130	11283	1	20564	20909	2	33734	35242	4
14	12068	12248	1	20938	21660	2	36646	37718	4
15	11351	11742	1	22313	23197	2	32782	34088	4
평균	11074.67	11376.07	1	19110.93	19801.13	2	35151.93	36545.67	4

어는는데, 그것은 흡 제한을 만족하기 위해 에지가 추가되기 때문이다.

그리고 <표 2>는 <표 1>과 같은 초기해 그래프에 SS 방법을 적용했을 때의 결과이다. 이 방법을 적용했을 때도 마찬가지로 비용의 증가가 생겼고, <표 1>과 <표 2>의 평균값을 나

표 2. 노드 수가 다른 망의 SS 적용 결과

그래프	노드 수 15			노드 수 25			노드 수 45		
	초기 비용	비용	추가 에지 수	초기 비용	비용	추가 에지 수	초기 비용	비용	추가 에지 수
1	11143	13270	7	16710	20158	9	34482	39876	19
2	9751	12913	9	17603	22503	12	35674	41674	19
3	11216	13567	6	17946	27361	13	33885	39910	22
4	13305	15419	6	18215	19746	8	33406	40755	21
5	12873	17199	10	18375	21261	9	33629	41066	22
6	9888	13241	9	18462	21617	9	34420	40553	21
7	9807	11234	5	18480	22221	13	32401	38066	22
8	10500	12709	8	18487	22118	13	33319	41925	23
9	11759	14019	6	19269	25535	15	38803	44131	18
10	11336	14347	9	19557	24425	13	35630	42975	23
11	9961	14237	10	19636	21132	9	41957	47301	18
12	10032	11250	4	20109	19793	11	36511	43950	23
13	11130	12964	6	20564	23277	11	33734	38950	21
14	12068	13074	4	20938	20745	9	36646	42455	21
15	11351	13902	8	22313	24291	12	32782	41241	22
평균	11074.67	13556.33	7.13	19110.93	22412.20	11.07	35151.93	41655.20	21

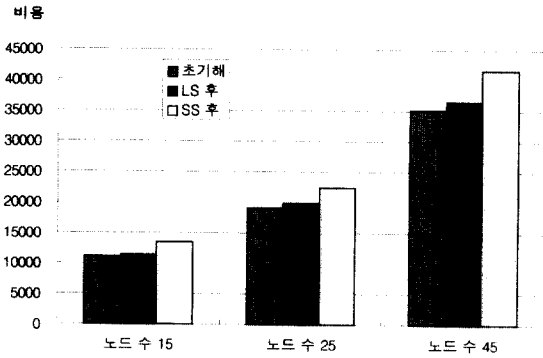


그림 14. 노드 수에 따른 망의 구축비용 비교.

타낸 <그림 14>를 보면 SS 방법보다 LS 방법을 적용하였을 때 비용의 증가가 훨씬 적은 것을 알 수 있다. 그리고 추가되는 에지의 개수 역시 노드의 수와 대체적으로 비례하여 늘어난다.

5.2 흡 제한 수 변화에 따른 결과

<표 3>은 노드의 수를 45, 생존도를 2로 고정한 후 흡 제한을 3, 5, 7, 16으로 변화시키면서 LS 방법을 적용한 것이다. 그리고 <표 4>는 같은 망에 SS 방법을 적용시킨 것이다. 두 가지 경우 모두 흡 제한이 커지면 추가되는 에지의 개수가 줄기 때문에, 흡 제한이 커질수록 흡 제한을 만족하는 해의 비용이 점차 작아진다. 그리고 <그림 15>와 같이 SS에 비해 LS 적용시

표 3. 흡 수가 다른 망의 LS 적용 결과

그래프	초기 비용	흡 제한 16		흡 제한 7		흡 제한 5		흡 제한 3	
		비용	추가 에지 수	비용	추가 에지 수	비용	추가 에지 수	비용	추가 에지 수
1	34482	34482	0	34774	2	35680	3	36453	4
2	35674	35674	0	36326	2	36191	3	36921	4
3	33885	33885	0	34676	2	34687	3	35577	4
4	33406	33406	0	33794	2	33979	2	34377	4
5	33629	33629	0	34088	2	34546	3	34840	4
6	34420	34420	0	35227	2	35653	3	35520	4
7	32401	32401	0	33105	2	32765	2	33639	4
8	33319	33319	0	33730	2	34160	3	35358	4
9	38803	38803	0	39125	2	40033	3	40052	4
10	35630	35630	0	36341	2	36694	3	37010	4
11	41957	41957	0	43011	2	43143	3	43643	4
12	36511	36511	0	37165	2	37028	2	37747	5
13	33734	33734	0	34222	2	34214	2	35242	4
14	36646	36646	0	37311	2	37694	3	37718	4
15	32782	32782	0	33249	2	33168	2	34088	4
평균	35151.93	35151.93	00	35742.93	2.00	35975.67	2.67	36545.67	4.07

표 4. 흡 제한 수가 다른 망의 SS 적용 결과

그래프	초기 비용	흡 제한 7		흡 제한 5		흡 제한 3	
		비용	추가 에지 수	비용	추가 에지 수	비용	추가 에지 수
1	34482	36470	10	37306	13	39876	19
2	35674	38873	13	39932	15	41674	19
3	33885	35693	11	36088	12	39910	22
4	33406	35499	10	36471	12	40755	21
5	33629	37222	13	38249	16	41066	22
6	34420	36696	11	37598	14	40553	21
7	32401	33941	10	35118	14	38066	22
8	33319	36520	11	38652	16	41925	23
9	38803	41641	11	41935	12	44131	18
10	35630	38428	13	39610	16	42975	23
11	41957	44873	13	45329	14	47301	18
12	36511	39166	12	40236	15	43950	23
13	33734	36912	16	37868	19	38950	21
14	36646	38252	8	40249	15	42455	21
15	32782	36230	11	38885	17	41241	22
평균	35151.93	37761.07	11.53	38901.73	14.67	41655.20	21.00

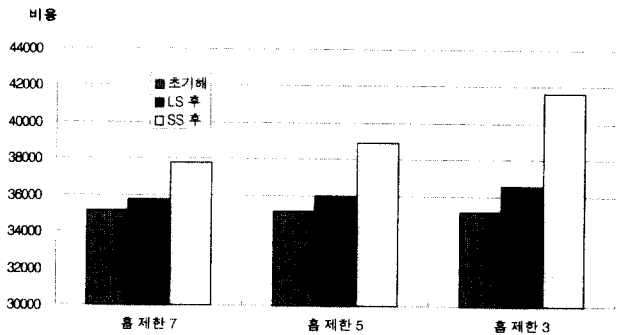


그림 15. 흡 제한에 따른 망의 구축비용 비교.

비용이 더 적게 드는 것을 알 수 있었다.

<표 3>과 <표 4>의 평균값을 가지고 망의 구축비용의 증가 형태를 알기 위해 증가율을 구한다. 이때의 비용 증가율은 다음과 같다.

$$\text{비용증가율} = \frac{\text{흡제한 후 비용} - \text{초기비용}}{\text{초기비용}} \times 100$$

이 증가율에 의해 구해진 값은 <그림 16>과 같다.

그리고 <표 3>과 <표 4>의 평균값을 가지고 SS와 LS의 증가율을 비교하기 위해  $\frac{\text{SS 후 비용 증가율}}{\text{LS 후 비용 증가율}}$  을 비교해보면 LS가 SS에 비해 얼마나 적게 비용이 증가했는지 가늠해 볼

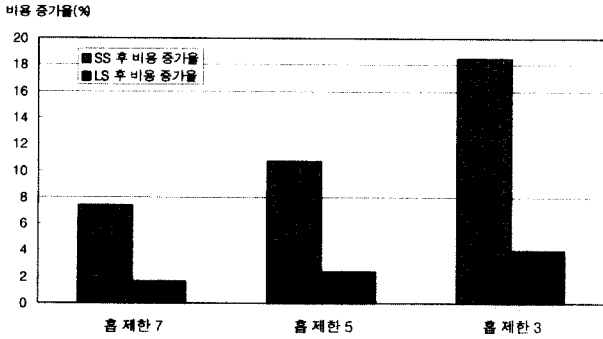


그림 16. 홑 제한에 따른 비용 증가율.

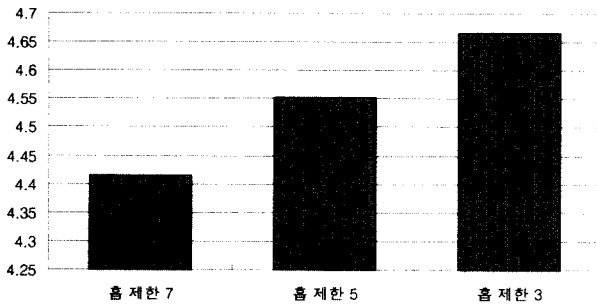


그림 17.  $\frac{\text{SS 후 비용 증가율}}{\text{LS 후 비용 증가율}}$

수 있다. 그 결과는 <그림 17>과 같다.

이렇게 홑 제한이 증가할수록 SS에 비해 LS의 비용 증가가 적음을 알 수 있었다. 이것은 즉 통신망상의 홑의 제한이 작을 수록, 즉 줄여야 할 홑 수가 많아질수록 LS가 더 효율이 높아짐을 뜻한다.

### 5.3 망 형태에 따른 SS와 LS의 비교

<표 5, 6, 7>은 망의 노드의 위치 분포에 따른 SS와 LS의 효율성을 보여 주고 있다. 실험 조건은 노드 수는 25, 홑 제한은 3, 생존도는 2이다.

우선 망의 형태가 X 좌표 범위 : Y좌표 범위 = 10 : 1인 경우인 망일 때 그 망에 홑 제한 방법을 적용하면 <표 5>와 같은 결과가 나온다.

그리고 망의 형태가 X 좌표 범위 : Y좌표 범위 = 2 : 1인 경우라면 그 결과는 <표 6>과 같다.

그리고 망의 형태가 X 좌표 범위 : Y좌표 범위 = 1 : 1인 경우의 결과는 <표 7>과 같다.

<그림 18>은 <표 5, 6, 7>의 평균값을 가지고 계산한 비용 증가율을 나타낸 것이다. <그림 18>에서 SS의 경우는 망의 형태가 정사각형에 가까울수록 비용 증가율이 커지는 반면 LS의 경우에는 비용 증가율이 작아진다. 이것은 망의 형태가 정사각형에 가까울수록 노드 사이의 각이 작아져서 LS가 SS 보다 더 효율적이 되는 것을 의미한다.

표 5. 그래프의 형태에 따른 망의 구축비용 (x 좌표 범위 : y 좌표 범위 = 10 : 1)

그래프	초기해	SS		LS	
		비용	추가 에지 수	비용	추가 에지 수
1	12365	13288	8	13568	2
2	13126	14873	12	13640	2
3	16470	18503	10	17318	2
4	10553	11827	12	10623	2
5	14048	14955	10	14133	2
6	12939	13713	7	13741	2
7	11780	14355	14	12130	2
8	10486	12041	11	10776	2
9	11143	14095	12	11452	2
10	14435	16102	12	14689	2
11	13094	13634	6	13542	2
12	11180	12572	10	11627	2
13	15442	16416	8	16028	2
14	11779	13070	9	12368	2
15	12017	15114	12	12120	2
평균	12723	14303	10	13183	2

표 6. 그래프의 형태에 따른 망의 구축비용 (x 좌표 범위 : y 좌표 범위 = 2 : 1)

그래프	초기해	SS		LS	
		비용	추가 에지 수	비용	추가 에지 수
1	15153	16275	8	16087	2
2	15243	18169	13	15781	2
3	18096	20664	10	18980	2
4	14333	16885	12	14624	2
5	16268	17971	11	16495	2
6	15568	16720	8	16427	2
7	14290	18490	16	14777	2
8	14199	17165	13	14702	2
9	13543	16502	9	14013	2
10	17600	19988	12	17945	2
11	15457	17547	10	15805	2
12	13327	14698	8	13769	2
13	17356	19134	10	17937	2
14	13959	15923	9	14601	2
15	14569	19210	15	14696	2
평균	15264	17689	10	15775	2

표 7. 그래프의 형태에 따른 망의 구축비용  
(x 좌표 범위 : y 좌표 범위 = 1 : 1)

그래프	초기해	SS		LS	
		비용	추가 에지 수	비용	추가 에지 수
1	17946	20158	9	19238	2
2	18462	22503	12	19316	2
3	22313	27361	13	23197	2
4	18215	19746	8	18801	2
5	19693	21261	9	20062	2
6	19269	21617	9	20188	2
7	17603	22221	13	18307	2
8	18480	22118	13	19008	2
9	19557	25535	15	20149	2
10	20564	24425	13	20909	2
11	18487	21132	9	19463	2
12	16710	19793	11	17152	2
13	20938	23277	11	21660	2
14	18375	20745	9	19097	2
15	20109	24291	12	20470	2
평균	19114	22412	11	19801	2

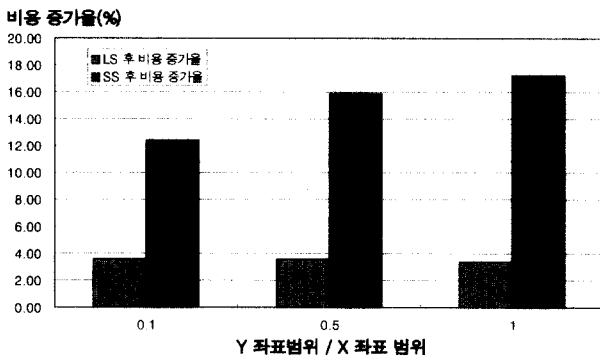


그림 18. 그래프 형태에 따른 비용 증가율 비교.

5.4 실험 결과 및 분석

<표 1>에서 노드의 수가 변해감에 따라 비용 자체도 선형적으로 변해감을 알 수 있는데, 이것은 노드 수 증가에 따른 비용 증가로써, LS 방법이 노드 수가 늘어나도 그에 따라 비용이 폭발적으로 늘지 않고 매우 안정적임을 알 수 있었다.

홉 제한을 적용하기 위해서 노드 사이의 경로를 설정할 때 가장 짧은 경로를 선택하였기 때문에, 노드 사이의 실제적인 경로는 가장 긴 경로라 하더라도 노드 수의 약 1/3 정도면 충분하였다. 그래서 홉 제한을 적용할 경우 노드 수에 비해 홉 제한

이 너무 커지면 초기해 자체가 홉 제한을 만족하기 때문에 추가되는 에지가 생기지 않았다. 이것은 <표 3>에서 노드 45개에 홉 제한이 16일 때 실제적으로 추가되는 에지가 없음을 알 수 있었다.

그리고 <표 3>과 <표 4>를 비교하여 보면 홉 제한의 수가 작을수록, 즉 줄여야 할 홉 수가 클수록 SS에 비해 LS가 비용 증가가 적어 효율적임을 알 수 있었다.

또한 <표 5, 6, 7>에서의 LS와 SS를 비교해 보면 망의 형태가 원형에 가까울수록 LS가 SS에 비해 비용의 증가율이 상대적으로 작아 LS를 이용한 홉 제한이 등근 형태의 망에 효율적임을 알 수 있었다.

<그림 15, 16>에서 LS와 SS를 같은 환경 하에서 모의실험 한 결과 LS는 기존 방법인 SS보다 망의 구축시 비용이 항상 작음을 알 수 있었다. 이것은 홉 제한 적용 시 여러 개의 에지를 추가하게 되는 SS에 비해 아주 적은 숫자의 에지를 추가하게 되는 LS가 효율적임을 나타내는 것이다.

6. 결론 및 향후 연구방향

본 논문에서는 Longest Shortcut을 이용하여 NP-complete로 알려진 홉 제한이 있는 생존 가능망을 설계하는 방법을 제안하였다. 망의 생존도를 고려하여 초기 생존 가능망을 설계하고 그 망에 국부 변환을 위한 X-변환을 적용하여 경로 설정 비용을 줄였다. 망의 크기가 방대하고 홉의 제한 수가 작은 경우, 즉 줄여야 할 홉 수가 많은 경우에 홉 수를 줄이기 위해 LS를 적용시켰다. 또한 망의 형태가 원형에 가까워질수록 LS가 효과적이었다. 이것은 LS의 특성상 망의 형태가 밀집되고 등근 형태에 가까울수록 노드 사이의 각이 작아지기 때문에 비용의 증가가 적게 나타나는 것이다.

망의 크기와 홉 제한의 비율이 어느 정도일 때 LS 방법이 효율적인지, 망의 크기와 홉 제한에 구애받지 않고 일반적으로 적용 가능한, 즉 SS와 LS의 장점을 적절히 구비한 방법에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

본 논문에서는 constructive 근사해를 찾는 것으로 검색을 중지하였다. 그러나 일반적으로는 추가적인 휴리스틱 방법을 사용하여 그 단계까지 찾은 해보다 더 나은 해를 찾을 수 있는 방법을 시도할 수 있다. 그 방법으로는 유전자 알고리즘, Simulated Annealing, Tabu Search 방법들이 있다.

기존의 연구에서 최적해가 알려져 있는 홉제한을 갖고 있는 생존가능망의 설계문제를 아직 찾지 못하였다. 추가적인 해의 개선 방안과 알려진 최적해와의 비교는 추후 연구로 가능할 것이다.

본 논문에서는 좌표를 임의로 선정하고 노드간의 유클리디언 거리를 노드간의 거리로 가정하였다. 그 거리는 비용행렬과 같은 방식으로 표시되는데 비용행렬을 변경시킴에 따라 유클리디언 거리가 아닌 망의 문제를 해결할 수 있을 것이다.



## 참고문헌

- Cardwell, R. H., Monma, C. L. and Wu, T. H. (1989), Computer-Aided Design Procedures for Survivable Fiber Communications, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 7(8), 1188-1197.
- Chan, K. S., Chan, S. and Ko, K. T. (1998), Hop-limited handoff scheme for ATM-based broadband cellular networks, *Electronics Letters*, 34(1), 26-27.
- Garey, M. R. and Johnson, D. S. (1979), *Computers and Intractability: A Guide to the Theory of NP-Completeness*, W. H. Freeman and Company New York, 214-218.
- Goemans, M. X. and Bertsimas, D. J. (1993), Survivable Networks, Linear Programming Relaxations and the Parsimonious Property, *Mathematical Programming*, 60(2), 145-166.
- Grötschel, M. and Monma, C. L. (1990), Integer Polyhedra Arising from Certain Network Design Problems with Connectivity Constraints, *SIAM J. Disc. Math.*, 3(4), 502-523.
- Herzberg, M. and Bye, S. J. (1994), An Optimal Spare-Capacity Assignment Model for Survivable Networks with Hop Limits, *GLOBECOM'94*, 1601-1606.
- Herzberg, M., Bye, S. J. and Utano, A. (1995), The Hop-Limit Approach for Spare-Capacity Assignment in Survivable Networks, *IEEE Transaction on Networking*, 3(5), 775-784.
- Jun, B. H., Han, C. G. (1999), A Heuristic Method for Design Problem of Survivable Network with Hop Limits, *Proceeding Of The Fall Conference, KICS*, 20(2), 671-674.
- Lee, J. K. (1996), *Learning Algorithm by C (II)*, Sehwa Publishing Company.
- Modiano, E. and Narula-Tam, A. (2001), Designing Survivable Networks Using Effective Routing and Wavelength Assignment(RWA), *Optical Fiber Communication Conference and Exhibit, 2001*, 2, TuG5-1-TuG5-3.
- Monma, C. L. and Shallcross, D. F. (1989), Methods for Designing Communications Networks with Certain Two-Connected Survivability Constraints, *Operations Research*, 37(4), 531-541.
- Oki, E. and Yamanka, N. (1995), A Recursive Matrix-Calculation Method for Disjoint Path Search with Hop Link Number Constraints, *IEICE Transactions on Communications*, E78-B(5), 769-774.
- Perraju, T. S. (1999), An Agent Framework for Survivable Network Systems, Performance, Computing and Communications Conference, 1999 *IEEE International*, 469-475.
- Steiglitz, K., Weiner, P. and Kleitman, D. J. (1969), The Design of Minimum-Cost Survivable Networks, *IEEE Transaction on Circuit Theory*, ct-16(4), 455-460.



## 곽선정

경희대학교 전자계산공학과 학사  
 경희대학교 전자계산공학과 석사  
 현재: FID  
 관심분야: 알고리즘, 네트워크 설계



## 한치근

서울대학교 산업공학과 학사  
 서울대학교 산업공학과 석사  
 The Pennsylvania State University, Computer Science,  
 Ph.D.  
 현재: 경희대학교 전자정보학부 교수  
 관심분야: 알고리즘, 네트워크 설계, 최적화