장애극복형 네트워크 설계에 관한 연구*

명영수** · 김현준***

On the Survivable Network Design Problem

Young-Soo Myung and Hyun-joon Kim

〈Abstract〉

As the fiber optic technology is rapidly being deployed in telecommunication networks, particular emphasis is placed on the survivability in designing networks. Most of the survivable network design models proposed to date have connectivity constraints, which cannot precisely define a network topology owing to the multiplicity of feasible ones. In this paper, we propose a k-link survivable network design model incorporating traffic-based survivability constraints which restrict the lost traffic due to a network failure under a prescribed level. Our model is shown to include the existing connectivity models as special cases. Then we present its integer programming formulation, analyze the structural properties, and develop a heuristic for obtaining low cost survivable networks.

1. 서론

광섬유를 이용한 광통신 기술이 빠르게 도입됨에 따라, 통신망의 구조는 과거에 비하여 매우 단순화되게 되었다. 이는 단위당 전송용량이 큰 광섬유를 이용함으로써, 노드설비(교환기 등)들 사이에 과거와 같은 복잡한 그물모양의 연결이 필요없게 되었기 때문이다. 이러한 망구조의 단순화는 비용면에서의 효율성을 높일 수는 있지만, 서비스 처리의 지속성면에서는 문제를 심화시키게 된다. 즉, 일부 구성요소의 장애시에는 서비스의 단절이라는 커다란 위험에 노출될 수 있는 것이다. (과거와 같은 복잡한 망구조하에서는 구성요소의 중복성으로 인하여 장애가 발생한 구성요소의 기능을 대체할 수 있는 다른 구성요소가 존재하게 된다.)

따라서 금후의 통신망설계에 있어서 무엇보다도 중요한 사항으로 고려되어야 하는 것이 통신망의 생존도라 할 수 있다. 일반적으로 통신망의 생존도는 망구성요소의 장애시에도 여전히 통신망의 본래적인 기능인 서비스의 처리를 수행할 수 있는 능력으로 정의된다. 이에 따라, 최근의 통신망 설계의 목표는 만족할 만한 수준의 생존도를 유지하면서 비용면에서도 경제적인 통신망을 설계하는 것이라 하겠다. Cosares 등(1995)은 일반적으로 보다 높은 생존도가 보다 높은 수준의 설계비용을 요구하므로, 비용과 생존도 사이의 상충(trade-off)관계를 정량화하는 것이 중요한 이

* 이 논문은 1995년도 한국학술진흥재단의 공모과제 연구비에 의하여 연구되었음.
** 단국대학교 천안캠퍼스 경영회계학부
*** 울산대학교 경영정보학과

슈임을 지적하고 있다.

최근들어 비용면에서의 효율성과 통신망의 생존도를 동시에 감안하는 망설계에 관한 연구들이 수행되어지고 있다. 그렇지만 대부분의 연구들은 생존도를 직접적으로 반영하기 보다는 노드설비들간의 연결성(connectivity)을 강화하는 것으로 생존도 반영을 대체하고 있다. 여기서 연결성이란 통신망의 노드간에 존재하는 중복되지 않는 경로의 수를 나타낸다. 이러한 연결성만을 고려한 통신망 설계 모형은 망의 모든 노드쌍들 사이에 미리 정해진 수만큼의 중복되지 않는 경로가 존재해야 한다는 소위 '연결성제약'을 포함하며, 결과적으로 통신망에 적정한 수준의 구조적 중복을 제공하게 된다. 그러나 이러한 구조적 중복에 의한 생존도의 평가는 복구 가능한 서비스량에 근거한 망의 생존도의 관점에서는 세밀하지 못한 기준이다. 이는 동일한 수준의 구조적 중복을 갖는 서로 다른 망도 서로 다른 수준의 생존도를 줄 수도 있다는 점으로부터 쉽게 설명되며 구체적인 예가 다음 장에 나타나 있다.

이러한 점에 착안한 새로운 연구의 방향이 정량적 생존도를 이용하는 방법이다. 즉, 일부 구성요소의 장애시에도 여전히 처리가능한 서비스의 비율로서 망의 생존도를 정의하고, 이러한 직접적이고 정량적인 지표를 감안하여 망설계의 효율성을 도모하고자 하는 시도들이다. 이러한 연구들에서는 먼저 k개의 링크에 동시에 장애가 발생하는 경우에도 여전히 처리되어질 수 있는 서비스의 최소 비율로서 k-링크 생존도를 정의한다. 그러면 정해진 수준의 k-링크 생존도를 유지해주는 통신망의 설계 모형이 정의될 수 있다. Wu (1992)는 연결성을 통한 제약을 질적인 생존도(Qualitative Survivability) 제약으로 규정하고, 본연구에서 채택한 바와 같은 서비스량에 근거한 생존도 제약을 양적인 생존도(Quantitative Survivability) 제약이라 규정하였다. 또한 양적인 생존도 설계 모형이 질적인 생존도 모형에 비하여 다루기 어려운 모형임을 지적하고 있다.

본 연구에서는 이러한 정량적 생존도에 근거한 네트워크 설계 모형을 다루고자 한다. 즉, 과거의 k-연결 (k-connected) 네트워크 모형은 k-1개까지의 구성요소 장애에 대해서는 100%의 서비스 처리율을 보장하나 k개의 구성요소 장애시의 서비스 처리율은 전혀 고려하지 않는 모형인데 반하여 본 연구에서는 k 개의 구성요소 장애에 대해서도 일정수준의 서비스처리를 유지시킨다는 추가적인 제약을 포함하는 포괄적인 k-링크 장애극복 네트워크 설계 모형을 제시하기로 한다. 본 연구의 대상은 네트워크의 topology만을 결정하는 모델이어서 링크의 용량은 고려하고 있지 않다. 현실적으로도 통신 네트워크를 설계할 때에는 네트워크의 topology의 결정과, 일단 결정된 topology를 기본으로 장애발생시의 rerouting에 필요한 링크의 용량까지 포함하는 포괄적 용량 결정과정을 이원화하여 최적의 네트워크를 결정하는 방법이 일반적으로 사용된다. 본 논문은 이 과정에서 첫번째 단계를 고려하는 것이며 나중 단계는 multiplexing, bundling 등의 요소가 포함된다.

이후의 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 정량적 생존도를 채택한 k-링크장애극복 모형을 제시하고 기존 모형과 비교 분석한다. 3장에서는 k-링크 장애극복 네트워크 설계 모형의 수리적모형을 만들고 정량적 생존도의 체계적 계산을 위한 방법을 제시한 다음, 이를 이용하여 k-링크 장애극복 모형의 Add-Drop형태의 발견적 해법을 제시한다. 4장에서는 해법을 코드화하여 실제크기의 문제에 적용한 계산 결과를 통해 제시된 해법의 효율성을 보인다.

2. 정량적 생존도와 네트워크 설계 모형

본 장에서는 서비스량에 근거한 정량적 생존도 지표와 이를 감안한 설계 모형을 정의하고, 이를 연결성에 근거한 기존의 통신망 설계 모형과 비교한다.

2.1 정량적 생존도

통신망의 정량적 생존도는 망구성요소의 일부에 장애가 발생한 경우에도 여전히 처리가능한 서비스량의 비율로 정의된다. 본 연구에서는 통신망의 링크장애만을 대상으로 하며, 고려되는 장애링크의 수가 k개일 때의 생존도를 k-링크 생존도라 한다. 교환기가 놓

여져 있는 노드집합 V와 노드간을 연결시키는 링크 집합 E로 구성되는 네트워크 G가 있다고 하자. 각 V에 속하는 두 노드쌍 i, j사이에 주어지는 서비스 처리요구량을 t_{ij}라 하고, k개의 링크장애에 따른 서비스의 최대 손실을 $W_{k(G)}$라 하면 네트워크 G의 k-링크 생존도 $S_{k(G)}$는 다음과 같이 표현된다.

$$S_{k(G)} = \frac{\sum_{ij \in V} t_{ij} \cdot W_k(G)}{\sum_{ij \in V} t_{ij}}$$

2.2 기존의 연결성을 고려한 모형

통신망의 생존도를 다루고 있는 많은 기존의 연구들은 연결성 제약을 이용한 접근을 시도하고 있다. 이러한 모형들을 CON모형이라 칭하기로 하자. CON모형에서는 V에 속하는 서로 다른 두 노드 i, j사이에 r_{ij}의 연결도가 유지되어야 한다는 형태로 제약이 주어진다. 그래프 G=(V, E)에 대하여 $\lambda(i, j;G)$를 노드 i, j사이에 존재하는 중복되지 않는 경로의 수라고 할 때, CON문제의 목적은 다음과 같은 제약을 만족시키는 최소비용의 네트워크 N=(V, F)를 찾는 것이 된다.

$$\lambda(i, j; G) \geq r_{ij} \qquad \text{for each pair} \quad i, j \in V$$

모든 노드간의 연결성 제약이 k로 일정한 경우의 CON모형을 k-연결 네트워크 모형이라하여 기존 통신망 설계의 기본 구조로 이용하여 왔다. k=2인 경우도 k-연결 네트워크 설계문제는 NP-hard 문제가 되어 CON모형도 이를 통하여 NP-hard임을 알 수 있다. Cardwell 등(1989)과 Monma 등(1989)은 광섬유를 이용하는 통신망 설계 문제에 k-연결 네트워크 모형이 잘 적용될 수 있음을 보이고 있으며, k=2인 이중연결 네트워크 모형에 대한 몇가지 휴리스틱을 제시하고 있다. 또한 Grötschel 등(1990)은 CON모형의 일반적인 형태를 서술하고 있으며, 몇가지 특화된 문제의 구조적 특성을 분석하고 있다. Grötschel 등(1992a, 1992b)은 낮은 연결성(단일 또는 이중연결)을 가지는 모형에 대한 수리적인 분석과 cutting plane법에 근거한 해법을 제시하고 있으며, Goemans 등(1993)은 링크의 비용함수가 triangle property를 만족하는 경우의 LP완화모형의 구조적 특성분석과 휴리스틱에 대한 성능분석을 하였다.

2.3 정량적 생존도를 고려한 망설계 모형

그러나 연결성 제약만을 고려한 망의 설계방법은 생존도에 대한 고려를 너무 단순화하는 단점을 갖고 있다. 이러한 점은 〈그림 1〉의 네트워크 모형을 통해 쉽게 설명될 수 있다. 노드집합 V와 설치후보링크의 집합 E로 구성되는 그래프 G에 대하여 각 후보링크 $e \in E$에 대한 비음의 설치비용 c_e가 주어진다고 가정한다. $S_k(N)$는 앞서 정의한대로 선택된 네트워크 N의 k-링크 생존도를 표시한다.

(a)와 (b)의 그래프는 모두 동일한 수준의 연결성을 가지고 있다. 둘 다 연결성은 1이다. 그러나 단일링크 생존도 (즉 $S_1(N)$)에 있어서는 상당한 차이를 보여주고 있다. (a)는 0.4이고 (b)는 0.6이다. 이처럼 정량적 생존도 측면에서는 상당한 차이가 있으나, CON모형에서는 이러한 차이를 고려하지 못하게 되고 비용이 싼(a)만이 선택될 수 있게 된다. 하지만 실제에서는 비용적인 차이가 크지 않은 경우에 (a)보다 (b)가 선호되는 경우도 존재할 것이다. (c)의 그래프를 생각해 보자. 이 그래프는 모든 노드간의 연결도가 2가 된다. 결국 연결도만을 고려한 망설계를 시도하는 경우, 우리의 선택은 예산이 5이상일 경우에는 (c)가 될 것이며, 그렇지 못하면 (a)가 될 것이다. 그러나 예산이 4.4이상은 가능하나 5는 되지 못하는 경우 최선의 생존도를 원한다면 (a)보다 나은 생존도를 보장하는 (b)를 선택하는 것이 바람직할 것이다.

위와 같은 내용을 고려하기 위하여는 정량적 생존도를 고려하는 네트워크 설계모형이 필요하다. 그래프 G=(V, E)와 노드쌍간 서비스요구량 t_{ij} 및 각 후보링크 $e \in E$에 대한 비음의 설치비용 c_e가 주어져 있을 때, 정량적 생존도를 고려한 망설계문제는 요구되는 망 생존도 제약을 만족시키면서 그 설치비용이 최소가 되는 E의 부분집합 F를 찾는 문제가 된다. 즉, 생존도 제약조건은 k-링크 생존도를 정해진 수준 s_k이상

으로 유지할 것을 요구하는 형태로 주어지게 된다. 이러한 모형을 SUR모형이라 하자. 결국 SUR모형은 다음과 같은 생존도 제약을 만족시키는 최소비용의 링크집합 F를 찾는 문제로 정형화된다.

$$S_l(N) \geq s_l, \qquad l = 0, 1, \cdots, k.$$

본 연구에서는 $s_0 = \cdots = s_{k-1} = 1, 0 \leq s_k \langle 1$ 인 SUR모형, 즉 k-링크 장애극복 모형을 중점적으로 다루기로 한다.

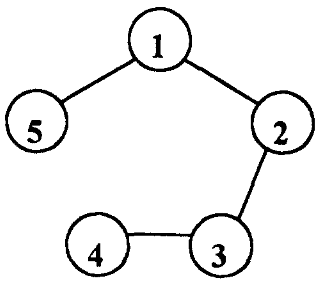
s_k=0 인 k-링크 장애극복 모형은 k-연결 모형과 동일하게 된다. s_1=0인 1-링크 장애극복 모형은 최소비용걸침나무(Minimum Spanning Tree)문제가 되며, s_2=0인 2-링크 장애극복 모형은 이중연결망 설계문제(Two-connected Network Design Problem)가 된다. Myung 등(1994)은 복잡한 CON모형도 SUR모형의 특수한 형태로 표시됨을 보였다. 그들은 CON모형의 연결도 요구가 SUR모형의 서비스 요구로 적절히 변환될 수 있음을 보임으로써 r_{ij}가 k로 고정되지 않는 일반적인 경우의 CON문제도 SUR문제의 특수한 경우임을 설명하고 있다.

이제까지 통신망을 설계할 때 비용을 최우선으로 고려하는 경우에는 걸침나무의 형태로 설계하고, 생존도가 강조되는 경우에는 이중연결망의 형태를 갖는 것이 일반적이었다. 그러나 최근에는 보다 생존도가 강조된 3중 또는 그 이상의 연결도를 가지는 망이 필요로 되는 경우도 생기게 되었으나 충분한 연결도를 가지는 통신망의 설계에는 많은 비용이 소요되게 되므로, 망설계자들은 비용과 연결성이라는 두가지의 상충적인 속성을 적절히 조화시키는 것이 중요한 과제가 되었다. 이러한 관점에서 볼 때, 본 연구에서 제시되는 모형은 망설계자들에게 상충되는 두가지 요소를 적절히 조화시켜줄 수 있는 가치있는 모형이라 할 수 있다.

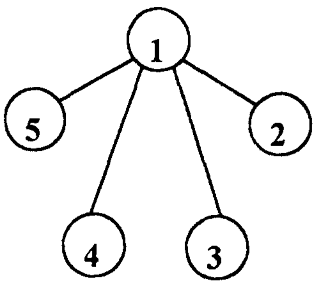
$C_{12}=C_{23}=C_{34}=C_{45}=C_{15}=1$

$C_{13}=C_{14}=C_{24}=C_{25}=C_{35}=1.2$

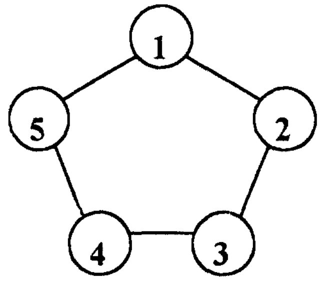
$t_{ij}=1, \forall i \langle j \in V$



(a) $S_0(N)=1,\ S_1(N)=0.4$



(b) $S_0(N)=1,\ S_1(N)=0.6$



(C) $S_0(N)=1,\ S_1(N)=1$

〈그림 1〉 네트워크의 정량적 생존도

3. k-링크 장애극복 모형

본장에서는 k-링크 장애극복 모형의 수리적 모형 및 구조적인 특성을 분석하고, 이 모형에 대한 적절한 해를 도출할 수 있는 발견적 해법(heuristic method)을 제시하기로 한다.

3.1 수리적 모형 및 구조적 특징

k-링크 장애극복 모형은 정수계획법 모형으로 나타낼 수 있다. 이를 위하여 다음과 같은 추가적인 정의가 필요하다. 그래프 G=(V,E)가 주어진 경우, V의 임의의 부분집합 W에 대해서 $\delta(W)$를 W와 V \ W에 걸쳐있는 링크의 집합이라 하자.그러면 $\delta(W)$는 하나의 컷(cut)을 의미하게 된다. 또 W에 속하는 노드 i와 V \ W에 속하는 노드 j에 대하여 $\delta(W)$를 i-j 컷이라 한다. 한편 링크의 부분집합을 incidence 벡타 $x\in\{0,1\}^{|E|}$로 나타내기로 하자. 그리고 임의의 링크집합 F ⊆ E에 대하여 x(F)는 $\Sigma_{e\in F}x_e$를 나타내는 것으로 정의한다. 마지막으로 노드집합 W ⊆ V에대하여 t(W)는 W에 속하는 노드들과 V \ W에 속하는 노드들간의 서비스 요구량의 합($\Sigma_{i\in W}\Sigma_{j\in V\setminus W}t_{ij}$)을 나타낸다.그러면 k-링크 장애극복 네트워크 설계 문제는 다음과 같은 정수계획법 문제로 모형화된다. 여기서 $tt=\Sigma_{i,j\in V}t_{ij}$이다.

$$Min \sum_{i,j\in E} c_{ij}x_{ij} \tag{1}$$

$$\text{s.t.}\ x(\delta(W)) \geq \begin{cases} k & \text{if } t(W)\leq tt(1-s_k) \\ k+1 & \text{otherwise,} \end{cases} \quad \text{for every } W\subset V \tag{2}$$

$$x_{ij}\in\{0,\ 1\}, \qquad \{i,\ j\}\in E \tag{3}$$

(2)의 의미는 다음과 같다. s_0 부터 s_{k-1}까지는 값이 1이기 때문에 모든 노드분할 (W, V \ W)사이에는 적어도 k개의 링크가 필요하고, 특히 노드 분할 사이의 서비스 요구량의 합이 손실되는 경우 요구 생존도 수준을 미달하면 (즉 $(tt-t(W))/tt < s_k$이면) k+1개의 링크가 필요하게 된다. Partition inequalities라고 불리우는 (2)와 같은 형태의 제약식은 기존의 망설계모형에서 이미 이용되고 있다(Chopra 등(1994), Grötschel 등(1990, 1992a, 1992b)).

3.2 k-링크 생존도의 계산

이미 언급한 바와 같이 네트워크의 모양에 따라 k-링크 생존도의 값은 달라진다. 본 절에서는 주어진 네트워크에서 k-링크 생존도의 값을 계산하는 방법을 제시하기로 한다. 여기에서 가장 기본적인 절차는 포함되는 링크의 수가 k인 모든 컷을 구하여, 각 컷에 해당하는 서비스 요구량을 계산하는 것이다. 이를 위하여 최소원소컷 (minimum cardinality cut)을 모두 찾아내기 위하여 개발된 Ball 등(1983)의 알고리즘을 사용한다. G/{i, j}는 그래프 G의 두 노드 i와 j를 하나의 노드로 축약(contraction)하여 얻어지는 그래프를 의미하는 것으로 정의한다. 두 노드 i와 j가 하나의 노드 l로 축약되는 경우, 노드 l과 다른 노드 l′ 사이의 서비스 요구량은 $t_{il'}+t_{jl'}$로 대체되게 된다.

k-링크 생존도 계산을 의한 절차, Survivability는 다음과 같다.

Procedure Survivability

(1) $\bar{t}=0$으로 $tt=\sum_{i,j\in V}t_{ij}$로 초기화한다.

(2) $|V|$가 1이 될 때까지 아래의 단계를 반복한다.

(2.1) V에 속하는 서로 다른 두 노드 i와 j를 선택한다.

(2.2) 만일 i와 j사이의 서로다른 경로의 수가 k라면, 최소원소 i-j컷 $\delta(W)$를 찾아서 $\bar{t}$의 값을 max{$\bar{t}$, t(W)}로 조정한다. 이 때, $i\in W$, $j\in V\setminus W$이며, $|\delta(W)|=k$이다.

(2.3) 노드 i, j를 하나의 노드로 축약한다 (G:=G/{i, j}).

(3) $S_k(G) = (tt-\bar{t}) / tt$.

이제 위에 제시된 절차가 가지는 계산상의 복잡도(computational complexity)를 분석해 보자. Ball 등(1983)은 그래프 G=(V, E)의 임의의 두 노드사이에 $\lambda(i, j;G)$개의 중복되지 않는 경로가 있다면, $O(|E|)$의 시간내에 최소원소 i-j컷(minimum cardinality i-j cut)을 찾을 수 있음을 보였다. 따라서 i, j사이의 최소원소컷의 집합을 C(i, j ; G)라 하면, 모든 최소원소 i-j컷은 $O(|C(i,j;G)|\ |E|)$의 시간내에 구해지게 된다. 또한 t(W)는 $O(|V|^2)$의 시간내에 계산되게 되므로 Step (2)는 $O(|V|T+|C(G)|(|V|^2+|E|))$의 시간내에 처리되어진다. 여기서 T는 $\lambda(i, j;G)$개의 중복되지 않는 경로를 찾는데에 소요되는 시간이며, C(G)는 G의 모든 최소

원소컷의 집합을 의미한다. 또 최근에 Nagamochi 등(1992)은 그래프 G=(V, E)에 대해서, G의 모든 최소원소컷을 그대로 유지하며 링크의 수는 줄어드는 서브그래프 G′=(V, E′)를 $O(|E|)$의 시간내에 구할 수 있음을 보였다. 또한 Nagamochi 등(1991)은 $O(|E'|)$ 시간내에 $\lambda(i,j;G')$개의 중복되지 않는 경로를 찾을 수 있음을 보였다. 결국, 이들의 알고리즘을 수정적용하면, Step (2)는$O(|E|+k|V|^2+|C(G)|(|V|^2+k|V|))$시간내에 처리될 수 있다.

3.3 발견적 해법

본 절에서는 k-링크 장애극복 네트워크 설계 문제에 대한 실행가능한 해를 도출할 수 있는 발견적 해법을 제시하기로 한다. 전술한 바와 같이 특화된 경우로서 s_k의 값이 0인경우에는 최소비용의 k-연결 네트워크 설계문제가 되므로 많은 여타의 연구에서 제시된 해법을 적용할 수 있다(Ko 등(1989), Kruskal (1956), Monma 등(1989), Prim(1957)). 따라서 본연구에서는 s_k의 값이 0과 1사이에 있음을 가정한다.

제시되는 휴리스틱은 combinatorial 문제에 대한 일반적인 휴리스틱과 같이 반복적으로 링크를 추가하여 실현가능한 초기해를 찾는 ADD 절차와 비용면에서의 효율성을 제고시키기 위하여 불필요한 링크를 제거해가는 DROP 절차로 구성된다.

먼저 ADD 절차를 설명한다. k-링크 장애극복 네트워크 설계 문제의 정의에서 보는 바와 같이 실현가능한 해는 적어도 k-연결의 네트워크이다. 따라서 ADD 절차는 먼저 이미 알려진 해법을 통하여 k-연결 네트워크를 구성한 후, k-링크 생존도 제약을 충족시킬 수 있도록 반복적으로 링크를 추가해 간다. k=1 일때는 Kruskal(1956) 또는 Prim(1957) 등의 알고리즘을 통하여 최소비용의 MST(Minimum Spanning Tree)를 구한 후, 단일링크 생존도 제약을 충족하도록 링크를 추가해가며, k가 2인 경우에는 Monma 등(1989)의 해법을, k가 3이상인 경우에는 Ko 등(1989)의 해법을 적용하여 적절한 k-연결 네트워크를 구한 후, 링크추가절차를 거치게 된다.

링크를 추가해가는 매 단계마다 k-링크 생존도 제약을 충족시키는지에 대한 판단을 해야 하므로 각 단계에서 구해진 네트워크에 대한 k-링크 생존도를 계산해야만 한다. 이를 위해서 앞에서 제시한 Survivability 절차가 이용된다. ADD 절차는 다음과 같이 정형화될 수 있다.

Procedure Add

(1) 적정의 기존 알고리즘을 통하여 (V, F)가 k-연결 네트워크가 되게 하는 $F \subseteq E$를 찾고, G′=(V, F)로 초기화한다.

(2) $|V|$ 이 1이 될 때까지 아래의 단계를 반복한다.

(2.1) V에 속하는 서로 다른 노드 i와 j를 선택한다.

(2.2) 만일 $\lambda(i,j;G')>k$이면 노드 i와 j를 하나의 노드로 축약한다(G′:=G′/{i,j}). 그렇지 않은 경우 ($\lambda(i,j;G')=k$)라면, $t(W)>tt(1-s_k)$를 만족하는 최소원소 i-j컷인 $\delta(W)$를 찾고, W와 $V\backslash W$를 연결하는 아크 {u, v}를 정하여 F에 추가한 후 u, v를 하나의 노드로 축약한다.

즉, $F:=F\cup\{u, v\}$, $G':=G'/\{u, v\}$.

q를 Step (2.2)에서 고려되는 컷의 수라고 할 때, q는 Step (1)에서 초기해로서 만들어지는 네트워크의 최소원소 컷의 수보다 클 수는 없다. 따라서 Step (2)는 $O(|F|+n|V|^2+q(|V|^2+n|V|))$의 시간내에 처리되어지게 된다.

한편 반복적으로 링크를 추가시켜 가는 경우, 추가시키려는 링크를 선택하는 데에 있어서 몇가지 서로 다른 방법이 적용될 수 있다. 정량적 생존도 제약을 만족시키지 못하는 두 노드그룹을 연결하는 최소비용의 링크를 선택할 수도 있고, 양쪽 종단노드간의 서비스 요구량이 가장 큰 링크를 추가할 수도 있으며, 비용과 서비스 요구량을 절충하는 형태의 링크추가도 가능하다. 4장의 시험계산에서 이러한 다양한 접근법에 따른 해의 효율성을 비교하고 있다.

k-링크 장애극복 네트워크 설계 문제의 해를 구하기 위한 두번째 단계는 DROP 절차이다. DROP 절차에서는 현재까지 얻어진 네트워크에서 불필요한 링크(생존도 제약을 유지시키면서도 제외될 수 있는 링크)를 삭제해가는 과정이다. 현재까지 설치하기로 결정

된 각 후보링크들에 대해서, 해당링크의 삭제가 생존도 제약을 여전히 유지시키는지에 대한 검토를 실시하여 그 삭제여부를 결정하게 된다. 결국 이러한 DROP 절차에서 가장 중요한 단계는 생존도 제약의 만족여부를 검토하는 것이며, 이는 ADD 절차의 Step (2)를 수정적용하여 이루어지게 된다.

4. 시험적용 및 계산결과

k-링크 장애극복 네트워크 설계 문제를 풀기 위해 본 연구에서 제시된 휴리스틱은 C언어를 통하여 구현되었으며, 150MHz의 586PC상에서 이를 적용한 시험계산이 이루어졌다. 시험계산에 사용된 대상문제는 실제 서울 지역의 통신망을 대상으로 이루어졌으며, k값은 1과 2의 경우로 나누어서 적용되었다.

서울 지역의 통신망을 대상으로 한 문제에서 노드들은 현재의 전화국이며 링크는 현재 설치되어 있는 통신구를 고려하여 통신케이블을 설치할 수 있는 노드간에만 존재한다. 대상문제는 노드수 및 서비스 요구의 정도에 따라 분류되었으며, 각 그룹별로 10개씩의 문제를 포함시켰다. 결과는 그룹별로 평균하여 정리하였다. 〈표 1〉과 〈표 2〉는 서울 지역 문제에 대하여 각각 k가 1인경우와 2인경우의 시험적용결과를 보여주고 있다.

각 그룹별로 최종 설계비용과 결과적으로 얻어지는 k-링크 생존도의 값($S_{1(N)}$, $S_{2(N)}$)등이 포함되어 정리되었다. 초기해는 k-연결 네트워크을 구한 결과이며,최종해는 ADD 절차에서 추가링크를 선택하는 방법에 따른 결과를 비교하여 보여주고 있다. 표에서의 LC, MT, MR은 각각 최소비용기준, 최대 서비스 요구량 기준, 비용과 서비스 요구량의 최소비율 기준을 나타내고 있다. 일반적으로 최소비용기준을 사용하는 경우, 보다 비용효율적인 네트워크를 얻을 수 있음을 알 수 있다. 최종해에서 n_D는 DROP 절차에서 삭제되어진 링크의 수를 나타내고 있다. 대부분의 문제들에 대해서 제시된 해법은 적정한 시간에 만족할 만한 수준의 비용을 갖는 네트워크를 제공해 주고 있다고 하겠다.

시험적용 계산결과를 종합해 볼 때, k-링크 장애극복 네트워크 설계 문제에 있어서 k-연결 네트워크를 임의로 구하는 경우 k-링크 생존도가 50%정도 달성된다는 것을 알 수 있다. 그리고 추가적인 40%의 k-링크 생존도를 얻기 위해서 10에서 20%정도의 비용이 추가되어짐을 알 수 있다. 이러한 추가적인 링크 생

〈표 1〉 서울 자료에 대한 SUR(1) 문제의 계산결과

Problem	S_1	초기해		최 종 해											
				LG				LT				MR			
		Cost	$S_1(N)$	Cost	$S_1(N)$	n_D	CPU	Cost	$S_1(N)$	n_D	CPU	Cost	$S_1(N)$	n_D	CPU
Seoul-1	0.5	2411	0.392	2455	0.513	2	1.21	2488	0.513	2	1.15	2455	0.513	2	1.20
$\|N\|=48$	0.7	2411	0.392	2630	0.852	4	1.48	2557	0.852	2	1.15	2630	0.852	4	1.38
$\|T\|=48$	0.9	2411	0.392	2767	0.904	7	1.15	2898	0.909	5	1.21	2726	0.904	7	1.32
Seoul-2	0.5	2411	0.496	2425	0.523	1	2.31	2447	0.523	1	2.09	2447	0.523	1	2.09
$\|N\|=48$	0.7	2411	0.496	2548	0.723	2	2.20	2557	0.776	2	1.98	2548	0.723	2	2.30
$\|T\|=96$	0.9	2411	0.496	2744	0.907	8	1.92	2675	0.907	3	1.64	2744	0.907	9	1.98
Seoul-3	0.5	2411	0.465	2455	0.510	2	3.51	2504	0.505	1	3.51	2504	0.505	1	3.63
$\|N\|=48$	0.7	2411	0.465	2568	0.715	1	3.57	2597	0.715	2	3.57	2740	0.713	1	3.24
$\|T\|=144$	0.9	2411	0.465	2744	0.901	11	3.25	2954	0.902	6	3.41	2897	0.902	10	3.24
Seoul-4	0.5	2411	0.471	2425	0.507	1	5.21	2470	0.507	1	5.05	2425	0.507	1	5.22
$\|N\|=48$	0.7	2411	0.471	2548	0.716	2	5.32	2672	0.746	3	5.05	2637	0.716	3	5.27
$\|T\|=192$	0.9	2411	0.471	2826	0.903	9	4.29	2872	0.900	5	4.67	3056	0.900	13	4.83
Seoul-5	0.5	2411	0.468	2455	0.541	2	7.08	2483	0.557	1	5.49	2455	0.541	2	7.25
$\|N\|=48$	0.7	2411	0.468	2548	0.715	2	7.63	2608	0.715	1	7.03	2614	0.715	2	7.63
$\|T\|=240$	0.9	2411	0.468	2826	0.927	9	5.77	2841	0.922	3	5.00	3114	0.911	6	5.00
Seoul-6	0.5	2411	0.469	2487	0. 02	0	10.77	2507	0.545	0	10.27	2507	0.576	0	10.71
$\|N\|=48$	0.7	2411	0.469	2630	0.731	4	10.66	2557	0.717	1	10.38	2542	0.755	1	10.65
$\|T\|=288$	0.9	2411	0.469	3476	0.871	13	6.10	3294	0.870	7	6.43	3073	0.904	7	6.98

〈표 2〉 서울 자료에 대한 SUR(2) 문제의 계산결과

Problem	S_2	초기해		최종해											
				LG				LT				MR			
		Cost	$S_2(N)$	Cost	$S_2(N)$	n_D	CPU	Cost	$S_2(N)$	n_D	CPU	Cost	$S_2(N)$	n_D	CPU
Seoul-1	0.5	3406	0.396	3453	0.569	2	1.26	3456	0.569	5	1.27	3454	0.569	2	1.37
$\|N\|=48$	0.6	3406	0.396	3555	0.611	3	1.20	3504	0.619	6	1.27	3555	0.611	3	1.26
$\|T\|=48$	0.7	3406	0.396	3625	0.712	6	1.32	3792	0.701	5	1.43	3625	0.712	6	1.31
Seoul-2	0.5	3406	0.459	3557	0.523	0	2.09	3425	0.570	2	2.09	3557	0.523	0	2.19
$\|N\|=48$	0.6	3406	0.459	3532	0.601	5	2.03	3565	0.626	4	2.25	3532	0.601	5	2.09
$\|T\|=96$	0.7	3406	0.459	3625	0.709	6	2.14	3750	0.703	5	2.04	3625	0.709	6	2.25
Seoul-3	0.5	3406	0.494	3434	0.549	1	3.40	3498	0.512	0	3.74	3434	0.549	1	3.57
$\|N\|=48$	0.6	3406	0.494	3555	0.623	4	3.51	3737	0.601	3	3.63	3645	0.601	3	3.79
$\|T\|=144$	0.7	3406	0.494	3795	0.758	6	3.79	3958	0.758	6	3.68	4003	0.705	6	3.74
Seoul-4	0.5	3406	0.499	3483	0.511	0	5.11	3483	0.511	0	5.06	3483	0.511	0	5.11
$\|N\|=48$	0.6	3406	0.499	3555	0.611	3	5.00	3626	0.656	2	5.22	3626	0.656	2	5.11
$\|T\|=192$	0.7	3406	0.499	3795	0.726	5	5.21	3728	0.726	3	5.05	3728	0.726	3	5.22
Seoul-5	0.5	3406	0.479	3578	0.501	0	6.82	3612	0.523	2	7.58	3601	0.501	1	7.08
$\|N\|=48$	0.6	3406	0.479	3625	0.606	6	7.25	3914	0.667	4	7.36	3673	0.667	2	7.25
$\|T\|=240$	0.7	3406	0.479	3795	0.725	6	7.19	4009	0.725	4	7.25	3377	0.725	3	7.30
Seoul-6	0.5	3406	0.496	3483	0.499	1	10.28	3406	0.501	0	9.78	3406	0.501	0	9.94
$\|N\|=48$	0.6	3406	0.496	3695	0.600	4	10.33	3744	0.611	4	9.56	3732	0.585	4	9.77
$\|T\|=288$	0.7	3406	0.496	3696	0.680	5	10.44	3888	0.706	4	9.89	3696	0.677	5	10.10

존도와 비용과의 상관관계는 본 연구에서 제시되어진 정량적 생존도 모형의 현실적 응용필요성을 보여주고 있다고 하겠다.

5. 결론

광통신기술의 발달에 기인한 통신망의 구조적 특성 변화하에서 망의 생존도는 점차 중요한 이슈로 대두되고 있다. 본 연구에서는 노드간의 연결도를 토대로 생존도를 제고시키려는 기존의 연구들과는 달리 망에 주어지는 서비스요구량을 기반으로 한 정량적 생존도의 개념에 기초하여, 이를 반영할 수 있는 망설계모형인 k-링크 장애극복 네트워크 설계 모형을 제시하고, 현실적 해의 도출을 위한 ADD-DROP형태의 발견적 해법을 개발하였다. 알고리즘의 구현을 통한 시험계산의 결과는 제시된 모형 및 해법이 현실적으로 적용가능함을 보여주고 있다.

【참고문헌】

[1] Ball, M.O. and J.S. Provan, "Calculating bounds on reachability and connectedness in stochastic networks", Networks, 13 (1983), 253-278.

[2] Bixby, R.E., "The minimum number of edges and vertices in a graph with edge connectivity n and mn-bonds", Neworks, 5 (1975), 253-298.

[3] Cardwell, R.H., C.L. Monma, and T. Wu, "Computer-aided design procedures for survivable fiber optic networks", IEEE J. SAC, 7 (1989), 1188-1197.

[4] Chopra, S. and M.R. Rao, "The Steiner tree problem I: Formulations, compositions and extensions of facets", Mathematical Programming, 64 (1994), 209-231.

[5] Cosares, S., N.D. Deutch, I. Saniee, and O.J. Wasem, "SONET toolkit: A decision support system for designing robust and cost-effective fiber-optic networks", Interfaces, 25 (1995), 20-40.

[6] Garey, M.R. and D.S. Johnson, Computers and intractability: A guide to the theory of NP-completeness, Freeman, San Francisco 1979.

[7] Goemans, M.X. and D.J. Bertsimas, "Survivable networks, linear programming relaxations and the parsimonius property", Mathematical Programming, 60 (1993), 145-166.

[8] Gomory, R.E. and T.C. Hu, "Multi-terminal network flows", SIAM J. Appl., Math. 9 (1961), 551-570.

[9] Grötschel, M. and C.L. Monma, "Integer polyhedra arising from certain network design problems with connectivity constraints", SIAM J. Disc. Math., 3 (1990), 502-524.

[10] Grötschel, M., C.L. Monma, and M. Stoer, "Facets for polyhedra arising in the design of communication networks with low-connectivity constraints", SIAM Journal on Optimization, 2 (1992), 474-504.

[11] Grötschel, M., C.L. Monma, and M. Stoer, "Computational results with a cutting plane algorithm for designing communication networks with low-connectivity constraints", Operations Research, 40 (1992), 309-330.

[12] Ko, C.W. and C.L. Monma, "Heuristic methods for designing highly survivablecommunications networks", Technical report, Bellcore 1989.

[13] Kruskal, J.B., "On the shortest spanning tree of graph and the traveling salesman problem", Proceedings of the American Mathematical Society, 7 (1956) 48-50.

[14] Monma, C.L. and D.F. Shallcross, "Methods for designing communications networks with certain two-connected survivability constraints", Operations Research, 37 (1989), 531-541.

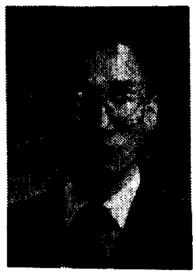
[15] Myung, Y.-S., H.-J. Kim, and D.-W. Tcha, "Design of communication networks with survivability constraints", Proc. KTIS 94, 1994, 42-46.

[16] Nagamochi, H. and T. Ibaraki, "A Linear-time algorithm for finding a sparse k-connected spanning subgraph of a k-connected graph", Algorithmica, 7 (1992), 583-596.

[17] Nagamochi, H., Z. Sun, and T. Ibaraki, "Counting the number of minimum cuts in undirected multigraphs", IEEE Trans. Reliability, 40 (1991), 610-614. bib

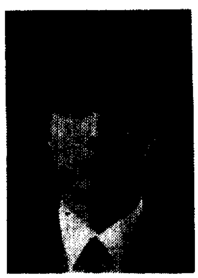
[18] Prim, R.C., "Shortest connection networks and some generalizations", Bell System Technical Journal, 36 (1957), 1389-1401.

[19] Wu, T., Fiber network survivability, Artech House, Boston 1992.



명영수

현재 단국대학교(천안) 경영학과 교수로 재직중이다. 서울대학교 경영학과에서 경영학사(1979), 한국과학기술원에서 산업공학석사(1981) 및 경영과학박사(1989)를 취득하였다. 삼성물산에서 근무하였고(1981-1984), 미국 MIT 대 OR 센터에 Visiting Scientist로 연구하였다(1990-1991). 주요 관심분야는 Combinatorial Optimization의 이론 및 응용이다.



김현준

서울대학교에서 경영학사(1983), 한국과학기술원 경영과학과에서 석사(1985), 박사(1993)학위를 취득하였다. 한국과학기술연구원 경제분석실에서 연구원으로 재직하였고(1985~1988), 현재 울산대학교 경영정보학과 조교수로 재직중이다. 주요 관심분야는 최적화 이론, Network 설계 및 성능분석 등이다.

'96. 8. 최초접수. 10. 최종수정