

구성요소 장애시의 통신망 성능지표 비교 연구*

김현준
경영학부

<요 약>

컴퓨터 기술 및 통신 기술의 발전은 통신망의 구조적 변화를 수반한다. 특히 전송매체의 대용량화는 설비간 링크수를 줄게하여 연결정도를 약화시키므로, 통신망 구성요소 장애발생시의 서비스 유지능력을 저하시키게 된다. 본 연구에서는 통신망의 이러한 장애대비능력을 측정해 볼 수 있는 지표로서 망 연결도(connectivity), 교환설비 생존도(node survivability), 전송설비 생존도(link survivability)를 대비시켜 본다. 또한 랜덤하게 작성된 대상망을 이용하여 각 지표들의 특성을 파악해 보고, 망 확장 시에 사용될 수 있는 전송설비 추가방법에 따른 생존도 지표의 변화를 분석한다.

Comparisons of Network Performance Measures under Component Failures

Hyun-joon Kim
Professor of Management Information Systems

<Abstract>

According to the evolution of computer and communication technology, there have been structural changes in communication networks. Particularly, the enlarged capacity of transmission media loosens the connectivity between node facilities and weakens the power of networks to cope with component failures. In this study, compared are

* 이 논문은 1998년 울산대학교의 연구비에 의하여 연구되었음.

various performance measures such as the node connectivity, node survivability, and link survivability. Computation procedures are proposed and experimental results are summarized, which show the characteristics of these measures. Also analyzed are the patterns how different link augmentation schemes (cost-based, degree-based, and random) affect the performance indices.

I. 서론

1980년대 후반 이후 컴퓨터 및 통신기술의 발전은 통신망을 둘러싼 기술적 환경에 많은 변화를 가져왔다. 대용량 교환기의 개발, 광통신 기술의 발전, 무선기술의 폭발적인 도입 등이 기술발전의 주된 요소라 할 수 있으며, 그 중에서도 광섬유를 이용한 광통신의 활발한 보급은 통신망의 기본적인 구조 및 구축·운용상에 획기적인 변화를 초래하고 있다. 대용량의 처리능력을 가지는 교환설비 및 전송설비의 도입은 망 구조의 단순화로 이어지게 되었고, 이로 인하여 설비의 부분적인 기능장애로 인한 통신서비스 단절에의 대처가 중요한 이슈로 부각되게 되었다(Cardwell, Monma, Wu, 1989).

망의 진화에 수반되는 가장 근본적인 변화는 망 구조에서 찾아볼 수 있다. 최근의 기술 변화는 광통신 관련 기술의 발전으로 인한 교환 및 전송용량의 확대에 대표된다. 여기서 광통신기술은 전송매체로서 광섬유의 도입, SONET등의 광전송기술, ATM등의 고속패킷 교환기술 등을 포함한다. 이러한 기술적인 변화는 유선망의 구조적 특성을 변화시킨다. 즉, 광섬유의 방대한 단위당 전송능력 및 전송오류의 극소화는 노드간 필요 회선 수 및 전반적인 망의 연결정도를 감소시킨다. 이러한 변화는 비용 측면에서의 효율성을 제고시키지만, 망 요소의 장애발생 시에 유발되는 서비스 단절의 위험을 가중시킨다. 이는 정보통신 기술을 이용한 부가가치의 규모가 점점 커지는 정보화의 진행과 더불어 더욱 중요한 이슈로 부각되게 된다(Wu, 1992). 따라서 보편적이고 안정적인 서비스를 제공해야만 하는 망 제공자의 입장에서는 이러한 특성을 잘 반영하는 망 성능지표를 규정하고 이를 반영하는 망의 설계 방법, 망의 운용 및 평가기법 등을 정립하는 것이 매우 필요하게 되었다.

한편 서비스의 안정적인 제공이라는 망 기능의 평가는 제공되는 서비스의 종류나 그 처리의 긴급한 정도, 기반이 되는 통신 프로토콜상의 특성 등이 반영되어야 하는 것이 타당하다. 이는 서비스의 안정적 제공과 같이 항상 고려되어야 하는 서비스 제공 비용의 경제성 제고라는 현실적인 목표를 간과할 수 없기 때문이다. 따라서 주어지는 망의 형태 및 서비스 특성, 프로토콜의 특성을 감안한 망 성능지표의 정립 및 분석은 광대역 통신망의 효율적인 구축 및 운용의 기초가 된다고 하겠다. 특히 교환 및 전송용량의 확대와 더불어 사회의 통신의존도는 더욱 증가하게 되고, 이로 인하여 기간통신망의 부분적인 기능장애는 엄청난 파급효과와 더불어 예상하기 어려운 경제적인 손실로 이어지게 된다. 결국 현대적인 개념 하에서 망 제공자는 대용량의 교환 및 전송설비로 구성되는 망을 제공하는 것과 더불어, 일부요소에 기능적 장애가 발생한다고 하더라도 통신망의 기능이 여전히 유지될 수 있는 방안을 동시에 모색할 수밖에 없다(Brush & Marlow, 1990). 즉, 구성요소별로 기능상의 장애가 발생하는 경우를 대비하는 대체설비를 추가로 설치하던가 또는 망 구성 시부터 여유용량을 두어 망을 설계함으로써, 유사시에도 안정적인 서비스의 처리를 지원하고

자 하게 되는 것이다. 기술적인 측면에서는 교환설비의 이중화 구조, DCS(Digital Cross-connect System)등의 장비를 활용한 전송 경로의 자동 대체 등이 활용되어 질 수 있다.

이와 같은 추가적인 기술요소들의 도입을 전제로 할 때, 통신망의 효과 또는 효율분석을 위한 새로운 지표의 필요성은 당연하다 하겠다. 어떠한 경우라도 기술적 타당성과 경제적 효과성은 균형을 이루어야 하며, 이러한 균형은 적절한 평가기준과 이를 감안한 망 구조의 설정에서 얻을 수 있기 때문이다.

본 연구에서는 이와 같은 통신망 환경의 변화흐름하에서 적정의 망 성능기준의 정립을 도모하고자 한다. 분석적인 시각에서 체계화되는 성능지표의 특성을 파악하고, 각 지표들의 산출방법을 제시하고자 한다. 망의 노드간 연결성과 전송설비의 장애에 따른 링크 생존도에 대해서는 기존연구에서 제시된 방법을 정리하며(Nagamochi, Ibaraki, 1992; Kim, 1998), 노드 설비의 장애에 따른 노드 생존도에 대해서는 그 개념과 산출방법을 같이 제시한다. 랜덤하게 만들어진 예제들을 대상으로 한 각 성능지표를 도출하며, 그 결과를 통하여 지표들의 특성을 분석한다. 시험 적용되는 예제들은 현실에서 접할 수 있는 규모의 통신망을 기준으로 만들었다. 결과분석을 통해서 본 연구에서 제시되는 성능 지표 및 산출방법은 현실규모의 통신망을 대상으로도 충분히 사용될 수 있음을 알 수 있다. 이러한 결과는 망 성능기준을 반영할 수 있는 망 설계모형의 정립 및 효율적인 해법의 개발을 위한 관련연구들의 기반을 제시할 수 있을 것이다.

2장에서는 본 연구의 대상이 되는 통신망 성능지표의 개념정립이 이루어진다. 이미 많은 연구의 대상이 되고 있는 노드간 연결도, 정량적 링크 생존도 등이 정리되며, 노드설비 장애시의 통신망의 대비능력 분석을 위한 노드 생존도가 정의된다. 아울러 각 지표들의 산출방법을 체계화한다. 3장에서는 제시되는 산출방법의 시험적용을 통해서 얻은 결과를 분석한다. 대상 망의 작성 방법과, 이를 통해서 작성된 예제들을 대상으로 이루어진 시험적용의 결과를 요약, 분석한다.

II. 망 성능 지표의 분석

본 장에서는 비교 분석의 대상이 되는 망 성능지표를 정의하고 그 특성을 파악하며, 각 지표들의 산출방법을 체계화한다.

2.1 망 성능지표의 정의

① 부호정의

일반적인 통신망을 수리적으로 네트워크 G 로 표현한다. 교환설비를 나타내는 노드집합은 $N = \{1, \dots, n\}$ 으로, 링크집합은 $E = \{(i, j) | i \in N, j \in N\}$ 로 나타내며, c_{ij} 로 링크 (i, j) 의 비용을 나타낸다. 또한 노드쌍 i, j 사이의 서비스 요구량은 $T = \{t_{ij}\}$ 로 나타낸다. 그리고, 그래프 G 의 노드 degree중 최소값을 $\delta(G)$ 로 나타낸다. 한편, 링크의 축약(contraction)은 링크를 삭제하고, 삭제되는 링크의 양쪽 종단노드를 하나의 노드로 합치는 것을 의미한다. 이후 그래프 G 에서 링크 (i, j) 가 축약된 그래프를 $G/\{i, j\}$ 로 나타낸다.

② 망 연결도(connectivity)

전술한 바와 같이 80년대 후반이후부터 기술적 발전에 따른 통신환경의 변화가 이루어지면서 통신망의 구조적 변화 및 기능평가에 대한 새로운 시각이 형성되었다. 이러한 시각에서 새로이 등장한 성능지표가 통신망의 생존도(survivability)이다. 즉, '망 구성요소의 일부에 기능적인 장애가 발생한 경우에도, 나머지의 구성요소를 이용하여 요구되는 서비스 처리를 어느 정도 수행할 수 있는가'라는 개념의 척도이다. 기존의 성능지표들이 기능적으로 불완전한 구성요소의 특성을 반영하여 '원하는 서비스를 원하는 때에 적절히 제공받을 수 있는가'라는 점에 비중을 두었다면, 생존도의 개념은 '어떠한 경우라도 원하는 서비스가 잘 처리될 수 있는가'라는 시각의 지표인 것이다. 서비스 처리에 대한 우선 순위가 처리되지 못하는 서비스 요구를 줄이는 방향으로 이동된 것이라 볼 수 있다.

이러한 생존도의 개념을 염두에 두고 이론적으로 먼저 연구의 대상이 된 것이 통신망의 노드간 연결 정도이다(Wu, Kolar, Cardwell, 1988; Monma, Shallcross, 1989). 이 개념은 서로 다른 두 개의 노드 설비간에 존재하는 서로 중복되지 않는 전달 경로의 개수를 의미하며, 그래프 이론에서의 노드간 연결도(connectivity)에 해당된다고 볼 수 있다. 이 연결도의 개념이 부각되고 연구의 대상이 된 것은 통신망의 노드간 연결도가 높으면 하나의 경로에서 구성요소의 기능장애가 발생하더라도 또 다른 경로를 이용하여 요구되는 서비스를 처리할 수 있기 때문이며, 그 개념이 분명하고 이미 그래프이론 분야에서 활발히 연구되어 있는 내용이기 때문이라 할 수 있다. 즉, 통신서비스의 시작과 끝이 되는 교환설비들간에 존재하는 '중복되지 않는 경로'의 수의 개념이며, 망 구조의 다중화 정도를 측정하는 개념이라 할 수 있다. 노드간에 중복되지 않는 두 개의 경로가 존재한다면, 하나의 전송 경로에 발생하는 장애에 대해서는 충분한 대비가 되어있다고 할 수 있는 것이다. 물론 이 경우에도 나머지 전송설비들이 충분한 용량을 가지고 있다는 전제가 필요하지만, 망 구조의 유연성 면의 지표로 활용될 수 있다. 본 연구에서는 이러한 개념을 망 연결도로 규정하여 다음과 같이 정의한다.

정의 1: 그래프 G 의 임의의 두 노드 설비간에 존재하는 서로 중복되지 않는 경로의 최소값을 망 연결도 $\lambda(G)$ 라 한다.

위의 정의와 같은 망 연결도는 망 전체의 시각에서의 특성을 반영하는 요소이며, 따라서 망 생존도로서의 의미는 부족하다. 다만, 통신망의 구조적 중복의 정도를 간단명료하게 보여주는 지표로서의 의미를 가진다고 하겠다. 즉, 망 연결도가 k 라고 하면, 어떠한 k 개미만의 전송링크에 장애가 발생한다고 하더라도 모든 노드설비간에는 상호 접속이 가능하다고 할 수 있는 것이다.

③ 링크 생존도(link survivability)

다음으로 90년대 이후에 보다 활발히 제시된 정량적 생존도가 있다. 앞의 망 연결도와는 달리 망 구조와 주어지는 서비스 요구를 동시에 감안하는 지표이며, 망 구성요소에 장애가 발생하였을 때에도 여전히 처리되어지는 서비스 요구량의 비율로서 정의된다(Brush, Malrow, 1992; Kim 1995). 이 지표는 망에 부과되는 서비스의 처리를 기준으로 분석할 수

있다는 장점을 가지지만, 특정시점에서 부과되는 서비스 요구량을 객관적으로 산출하기 어려울 수 있다는 제약을 가진다 하겠다. 링크설비의 장애에 대한 생존도는 다음과 같이 정의된다.

정의 2: 통신망의 링크 생존도는 부분적인 링크설비에 기능장애가 발생한 경우에도 여전히 처리되어 질 수 있는 서비스 요구량의 비율로 정의된다. 또한 고려되는 장애설비의 수가 k 개일 때의 링크 생존도를 k -링크 생존도라 하고 S_k 로 표현한다. 즉, S_k 는 어떠한 k 개의 링크설비에 장애가 발생되는 경우에도 여전히 처리되어질 수 있는 서비스 요구량의 비율을 나타낸다.

이러한 정의에 따를 때, S_k 를 산출하는 개념적인 식은,

$$S_k = \frac{\sum_{i,j} t_{ij} - W_k}{\sum_{i,j} t_{ij}}$$

와 같이 규정된다. 여기서 W_k 는 k 개의 링크 장애로 인한 최악의 서비스 손실을 나타낸다.

한편, 특정시점에 부과되는 서비스 요구와 상관없이 망의 구조적 유연성을 측정하는 지표로서도 링크 생존도가 활용될 수 있다. 즉, 모든 노드설비간에 요구되는 서비스의 양이 동일하다고 가정하면, 이 때의 링크 생존도는 부분적인 링크 설비 장애 시에도 여전히 상호 접속 가능한 노드 설비쌍의 수라는 의미를 나타내게 되며, 앞에 제시된 망 연결도보다 세밀한 성능지표로 활용될 수 있다. 본 연구에서는 망 연결도와의 비교를 위하여 이러한 개념의 링크 생존도를 사용한다.

④ 노드 생존도(node survivability)

링크 생존도와 동일한 개념으로 노드 생존도를 정의할 수 있다. 즉, 부분적인 노드 설비에 장애가 발생하는 경우에도 여전히 처리되어질 수 있는 서비스 요구량의 비율로 정의할 수 있는 것이다.

다만, 노드 설비의 장애는 해당노드로부터 유발되는 서비스 요구의 처리를 불가능하게 하므로 정량적인 기준의 지표로서 활용할 것인가의 여부가 의미있게 된다. 즉, 전술한 링크 생존도에서와 같이 서비스 요구량을 배제한 채, 노드 설비의 장애 발생시에도 상호 접속 가능한 노드 설비 쌍의 수라는 개념으로 규정함으로써, 보다 일반적인 시각에서의 망 성능지표로 활용될 수 있을 것이다.

개념적으로 동일한 지표를 따로 정의하는 것은 설비특성의 차이로 인하여 그 구체적인 값이 의미하는 정도의 차이가 있기 때문이며, 또한 그 산출방법에 있어서 많은 차이가 있기 때문이다.

⑤ 기타

이 외에 또 다른 시각에서의 지표로서 서비스 신뢰도(reliability)나 가용도(availability) 등이 있다. 서비스 신뢰도는 개별 서비스 사용자 입장에서 정보전송을 시도했을 때에 성공적인 전송이 이루어지는 비율로서 정의될 수 있으며, 정보전송에 관련되는 망 구성요소가

정상적으로 작동하고 있을 확률로서 정의된다. 가용도는 전화통화 시도시 용량부족으로 인한 blocking과 같이 원하는 서비스가 제공되지 못하는 정도를 감안하는 지표이다. 다만 이들 서비스 신뢰도나 가용도는 서비스 사용자의 시각에서 정의되는 지표로서 망의 구조적 특성을 직접적으로 반영하지는 않는다.

⑥ 성능지표의 상호비교

본 연구에서는 현재 망 연결도와 정량적 지표로서 링크 생존도 및 노드 생존도를 주요 분석대상지표로 선정하였다. 이들 지표들이 망제공자의 입장에서 또는 객관적인 시각에서 대상망의 보편적 성능을 평가하는 기준이 될 수 있기 때문이며, 또한 체계화된 관련연구가 어느 정도 이루어졌기 때문이다(Grötschel, Monma, Stoer, 1992; Nagamochi, Ibaraki, 1992; Kim, 1995).

통신망 성능관련 지표들의 개념적인 특성을 기준으로 한 비교는 아래의 <표 2-1>과 같이 정리될 수 있다.

<표 2-1> 망 성능지표의 개념적 비교

구분	개념적 정의	기능적 특성	산출방법
망 연결도	노드간 중복되지 않는 경로의 수	구조적 중복성	Flow problem Nagamochi <i>et al.</i> (1992)
링크 생존도	링크 설비 장애시 유지되는 서비스의 비율	장애발생시 서비스처리능력	Kim(1995) Myung <i>et al.</i> (1999)
노드 생존도	노드 설비 장애시 유지되는 서비스의 비율	장애발생시 서비스처리능력	-

본 연구에서는 이들 지표들을 대상으로 각 지표들의 특성분석, 망 규모 또는 망 구조의 변화에 따른 지표값의 변화 분석을 행하였다. 또 각 지표를 이용한 망 성능기준제약이 주어질 때, 결과로서 나타나는 망 구조의 특성을 감안하여 통신망 설계시의 일반적인 지침을 제시하고자 하였다.

2.3 성능지표의 특성 및 산출방법

① 망 연결도의 특성 및 산출방법

전술한 바와 같은 생존도 개념의 중요성 부각에 따라 먼저 연구되기 시작한 부분이 상대적으로 약화된 노드간의 연결성을 제고시키자는 노력이었다. 즉 노드간의 통신회선의 수가 적어지고, 따라서 전송링크 상에 이상이 발생했을 경우 이를 대체할 수 있는 여유회선을 확보함으로써, 서비스의 연속성을 보장할 수 있다는 개념이며, 그 개념적인 단순성으로 인하여 폭넓게 연구되었고 또한 여러 분야에서 활용되고 있다. 특히 수리적인 측면에서의 특성분석이 용이하다는 장점도 가지고 있다. 즉, 여유회선의 의미는 양 종단노드간의 연결성(connectivity)으로 쉽게 표현되며, 기존에 매우 활발히 연구되어 있는 그래프상의 흐름 문제 및 그래프 단절문제와 많은 연관을 가진다.

이러한 접근(노드간의 연결성제고가 서비스의 연결성을 제고시킨다는 접근)은 Monma, Grötschel, Wu등에 의해서 활발히 연구되었다. 이러한 접근은 노드간에 필요로 되는 연결

성이 미리 주어진다. 전제아래 이를 만족시키는 망의 구성을 설계하는 방법론의 연구로 이어지고 있다(Monma, Schallcross, 1989; Grötschel, Monma, Stoer, 1992).

망 연결도는 임의의 두 노드 사이를 연결해 주는 경로의 최소수로 규정된다. 따라서 그래프를 분할시키는 최소링크 컷을 찾음으로서 망 연결도를 구할 수 있다. 본 연구에서는 Nagamochi와 Ibaraki(1992)가 제시한 최소링크 컷을 도출하는 알고리즘을 이용하여 망 연결도를 산출한다. 이들은 그래프 $G=(N, E)$ 에 대해서, $H_i=(N, E_i)$ 가 $G-(E_1 \cup \dots \cup E_{i-1})$ 의 최대 포리스트(forest)가 되도록 링크집합 E_i ($i=1, \dots, |E|$)를 정의하는 FOREST라는 절차를 제시하고 있으며, 이를 이용하여 노드집합을 분할시킬 수 있는 최소 수의 링크집합을 찾는 망 연결도 산출절차를 제시하고 있다. 이 절차는 최소 degree의 노드를 선택하여 그 노드로부터의 노드간 연결도를 확인하고, 이후 망 연결도에 영향을 미치지 않는 중복적인 링크를 축약하여 그래프를 줄여 가는 방법을 사용한다. 한편, 그래프 내의 두 노드사이의 연결도는 최대흐름문제를 이용하여 산출할 수도 있다(Ahuja, Magnanti, Orlin, 1993). 그러나 이 방법을 이용하여 망 연결도를 구하는 경우, 노드 수만큼의 흐름문제를 풀어야 하므로 계산상의 효율성이 떨어지게 된다. Nagamochi와 Ibaraki의 프로시저 FOREST를 이용한 망 연결도 산출절차는 다음과 같이 정형화된다.

Procedure Connectivity

(1) 초기화

$$G' = G; k = +\infty;$$

(2) G' 의 노드 수가 하나가 될 때까지 다음을 반복한다.

① FOREST를 이용하여 E' 의 partition $E_1, E_2, \dots, E_{|E|}$ 을 구한다.

② 최소 degree를 갖는 노드 w 를 찾는다.

③ k 를 아래와 같이 수정하고, 하나의 링크를 축약한다.

$$k = \min \{k, \delta(G')\};$$

$$\text{Let } G' := G' / \{u, v\} \text{ with a link } (u, v) \in E_{\delta(G')};$$

(3) G 의 망 연결도는 k 이다.

② 링크 생존도의 특성 및 산출방법

정량적 생존도는 최악의 상태에서도 유지될 수 있는 서비스 제공 능력을 의미한다. 즉 어떤 순간에 망의 구성요소 중 하나의 요소에만 장애가 발생한다고 할 때, 어느 요소에 장애가 발생한다고 하더라도 전체 서비스 요구량 중에서 90%이상이 유지된다고 하면 이때의 생존도를 90%라고 정의하는 것이다.

이러한 생존도는 그래프 이론에서의 최대컷(maximum cut)의 개념과 대응된다. 즉, 특정의 링크에 장애가 발생함으로써, 망의 노드들이 단절된 2개의 그룹으로 분리된다고 하면, 이때 양 그룹에 속하는 노드들간의 서비스 요구는 처리될 수 없으며, 이와 같은 단절의 가능성을 모두 고려함으로써 링크장애에 따른 최대 피해를 알 수 있고, 이 양이 망의 생존도를 결정하게 되는 것이다.

그래프에서의 컷을 찾는 것은 이론적으로 단순한 문제가 아니다. 예로서, 서비스 요구량이 주어진 경우 노드들을 두 그룹으로 분리시키며, 분리된 그룹간의 서비스 요구량을 최대한으로 하는 컷을 찾는 문제는 NP-complete이다(Garey & Johnson, 1979). 그러나 동시에 장애가 발생하는 링크의 숫자가 제한되는 경우에는 문제가 어느 정도 단순화된다. 즉 하나의 링크만이 장애를 일으킬 수 있다고 가정하면 그래프 상에 존재할 수 있는 최대 $n-1$ 개의 bridge링크만을 대상으로 생존도 분석을 마칠 수 있다. 또한 동시에 2개의 링크가 장애를 일으킨다고 가정하면 두개의 bridge링크의 조합이나 또는 그래프상의 임의의 싸이클(cycle)에 공존하는 두 링크의 조합만을 고려함으로써 분석이 가능하게 된다(Kim, 1995). 또한 최대 k 개까지의 링크가 장애를 일으키는 경우라고 하더라도 k -연결성이 보장되는 경우에는 기존의 그래프이론에서 정리되어 있는 최소원소컷(minimal cardinality cut)을 검색하는 방법을 이용하여 적절한 시간 내에 분석할 수 있게 된다(Myung *et al.*, 1999).

결국 정량적 생존도의 계산은 그래프의 컷을 찾는 알고리즘을 통하여 이루어질 수 있으며, 본 연구에서는 기존의 연구결과들을 이용하여 링크 생존도를 산출하였다. 즉, 단일 링크 장애에 따른 생존도는 망의 bridge를 찾는 방법을 이용하였고, "cycle contraction"을 추가로 적용하여 효율성을 기하였다. 또, 2개 링크의 동시장애에 따르는 생존도는 그래프상의 임의의 cycle을 찾고, 그 축약(contraction)을 이용하여 그래프를 분리해 가는 cycle factoring 방법을 이용하였다(Kim, 1995). 한편, 일반적인 k 개 링크장애시의 생존도에 대해서, k -연결성이 보장되는 경우에는 그래프상의 최소컷(minimum cut)을 찾는 알고리즘을 활용하여 링크 생존도를 구하였고(Myung *et al.*, 1999), k -연결성이 보장되지 않는 경우에는 열거적 방법에 의존하여 링크 생존도를 구하였다. k -연결성이 보장되지 않는 경우를 포함하는 k -링크 생존도 산출절차는 다음의 프로시저 $worst(k, G)$ 를 사용한다.

Procedure $worst(k, G)$

- (1) $w=0$
- (2) G 의 노드수가 1이 될 때까지 다음을 반복한다.
 - ① N 에 속하는 서로 다른 두 노드 i 와 j 를 선택한다.
 - ② i, j 사이의 서로 다른 경로의 최대 수 l 을 구한다.
 - ③ 만일 $l=k$ 이면, i, j 사이의 최소원소컷을 찾고, w_{ij}^k 를 계산한다.
 - ④ 만일 $l < k$ 이면, i, j 사이의 최소원소컷을 찾아서 w_{ij}^l 를 계산하고, 분할된 두 그래프를 G_1, G_2 라 하자. 그러면,

$$w_{ij}^k = w_{ij}^l + \max \{ worst(k-l, G_1), worst(k-l, G_2) \}$$
로 계산된다.
 - ⑤ 최대 손실을 조정한다: $w = \max \{ w, w_{ij}^k \}$
 - ⑥ 노드 i, j 를 하나의 노드로 축약한다.
- (3) w 값이 k -링크 장애에 따른 최대 손실이다.

위에서 w_{ij}^k 는 i, j 를 분리시키는 k -링크컷에 따른 최대손실을 나타내며, 이를 이용하면, k 개의 링크 장애시에도 서로 접속 가능한 노드쌍의 비율로서의 k -링크 생존도 $S_k(G)$ 는 $({}_n C_k - W_k(G)) / {}_n C_k$ 가 된다.

③ 노드 생존도의 특성파악 및 산출방법

노드생존도와 링크 생존도는 그 지표의 의미를 기준으로 볼 때, 상당히 유사하다. 그러나 이들의 산출이라는 시각에서는 많은 차이를 가지고 있다. 즉, 링크 생존도는 링크 컷의 탐색을 통하여, 노드 생존도는 노드 컷의 탐색을 통하여 구해지게 되는데, 그래프 상에서의 링크 컷과 노드 컷은 그 특성상 판이한 성격을 가지기 때문이다. 예로서 한 노드의 기능장애는 해당 노드에 인접된 링크들의 동시적인 장애를 수반하게 되는 점을 들 수 있겠다.

본 연구에서는 산출과정의 효율성은 유보한 채, 우선적으로 노드 생존도를 구하는 데에만 역점을 두어 산출방법을 개발하였다. 현재까지 노드 컷의 산출에 관한 연구가 활발하지 않은 때문이기도 하며, 또한 본 연구의 대상인 생존도의 개념이 열거적 탐색에 의존할 수밖에 없기 때문이다. 산출방법의 기본적 사고는 노드별로 해당 노드의 기능과 인접한 링크의 기능을 정지시킨 채, 나머지 노드들간의 상호 접속 가능여부를 확인하는 것이다. 즉, 노드 그룹이 노드 컷이 되는 지의 여부를 열거적 방법으로 확인하고, 최대 손실을 유발하는 노드 컷을 찾아가는 것이다. 동시 장애 노드수가 많아지는 경우에는 매우 비효율적일 수 있지만, 동시장애 노드수가 상대적으로 적은 경우(2 또는 3정도)에는 적절한 수준의 계산 효율을 가질 수 있다. 이러한 결과는 3장의 시험계산결과를 통해서 확인 할 수 있다.

III. 시험계산을 통한 망 성능지표의 특성 비교

본 장에서는 2장에서 제시된 개념적인 성능지표 산출방법에 근거한 프로그램 코드를 이용하여 실제 성능지표들을 산출해 보고, 그 결과를 정리하였다.

3.1 망 성능지표 산출 절차

2장에서 정리한 망성능 지표 산출과정을 C언어를 이용하여 코드화하였다. 네트워크의 연결도 산출은 Nagamochi와 Ibaraki(1992)가 제시한 FOREST를 이용하는 절차를 구현하였고, 노드생존도는 노드간의 최대흐름문제를 반복적으로 풀어서 구하였다. 알고리즘의 효율성을 검토하는 것이 목적이라면, 열거적 방법에 근거한 최대흐름문제를 이용하는 것이 효율적이지 못하지만, 본 연구에서는 상황변화에 따른 망 성능지표의 변화를 분석하는 것이 목적이므로, 가능한 한 단순한 방법을 사용하였다.

한편, 링크설비 장애에 따른 링크 생존도의 산출은 Myung등(1999)에 의해서 제시된 방법을 수정, 보완하여 사용하였다. 먼저, k -연결 그래프에 대한 k -링크생존도 산출절차를 정형화하였다. 그리고, k -연결의 보장이 없는 일반적인 그래프를 $k(\leq k)$ -연결 그래프로 분할해가면서 정형화되어진 절차를 반복 적용하여 k -링크 생존도를 산출하였다.

3.2 대상망의 작성

2장에서 정리된 망 성능지표 산출방법의 시험적용 및 성능지표의 특성분석을 위하여, 적정규모의 통신망들을 랜덤하게 작성하였다. 망 작성 프로그램도 C언어를 이용하여 코드화하였으며, Pentium 150MHz PC에서 실행하였고, 그 세부적인 지침은 다음과 같다.

먼저, 작성될 망의 노드 수(N)와, 기본 연결도(K), 최소 링크수, 최대 링크수 등을 입력 받는다. 노드들의 위치는 사각형 범위 내에 임의의 좌표상에 위치시키고, 노드간의 거리에 근거하여 링크 설치 비용자료를 확보한다. 이후, 모든 노드들을 연결하는 임의의 걸침나무(spanning tree)가 구성되도록 최소한($|N|-1$ 개)의 링크를 추가한다.

이후, 입력되어지는 링크 추가 옵션에 따라, 정해진 수만큼의 링크를 추가하였다. 사용되어진 링크 추가 옵션에는 비용기준방식, degree기준방식, 랜덤방식을 사용하였다. 먼저, 비용기준 방식은 연결되지 않은 노드쌍 중에서 링크 추가 비용이 최소가 되는 링크를 선택하여 추가하는 방식이며, degree기준방식은 연결된 링크의 수가 적은 노드들을 우선적으로 연결하는 방식이다. 마지막으로 랜덤방식은 연결되지 않은 노드쌍 중에서 랜덤하게 선택하여 연결링크를 추가하는 방식이다.

물론, 이들 세 가지의 링크 추가방식이 현실에서 직접적으로 사용될 수 있는 방법은 아니지만, 시험적용 대상문제를 작성하는 방법으로는 흔히 사용되는 방법이다. 또한 비용기준방식이나 degree기준방식은, 망의 생존도를 강화시키는 망 설계 또는 망 확장 방법론의 세부단계에서 선택적으로 사용될 수 있는 방법이며(Myung, Kim, Tcha, 1999), 비용최적화와 망 성능기준 강화를 위한 특징적인 방법이기도 하다.

입력자료를 기준으로 동일한 기준에 의거하여 10개씩의 망을 작성하였으며, 시험적용결과도 이들 10개의 결과를 평균하여 정리하였다. 또한 노드설비간의 서비스 요구량은 균등하게 분포되어있는 것을 전제로 하였다.

3.3 망 성능지표의 비교

먼저 <표 3-1>~<표 3-6>은 작성되어진 대상 망에 대해서 성능지표 산출방법론을 적용시키고, 결과로 얻은 링크 추가방법에 따른 망 성능지표를 정리하고 있다. 이를 통하여 망 규모의 확장에 따른 망 성능지표의 변화를 볼 수 있으며, 또한 링크추가방법에 따른 망 성능지표의 변화형태도 알 수 있다. <표 3-1>~<표 3-3>은 노드수 30인 경우를, <표 3-4>~<표 3-6>은 노드수 50인 경우를 각각 대상으로 링크수가 10개씩 증가함에 따라 각 성능지표가 어떻게 변화하는 지를 보여주고 있다. 표에서 V_k 는 k -노드 생존도를, S_k 는 k -링크 생존도를 각각 나타낸다.

예상되던 바와 같이 링크수의 증가에 따라 모든 지표의 값이 증가하고 있다. 특히 망 연결도, 노드생존도, 링크 생존도 등의 모든 지표에서 degree기준 방식에 따른 링크 추가시에 월등한 향상 효과를 보이고 있다. 또한 비용기준 방식은 랜덤방식에 비해서도 지표값 향상의 면에서 효과가 떨어짐을 알 수 있다. 비용을 최소화시키려는 목적이 망 성능지표의 향상에 부정적인 영향을 주고 있는 것이다. 이 결과를 통하여 망 설계 또는 망 확장시에 상황에 적합한 링크추가방법의 선택이 중요함을 알 수 있다. 지표값의 증가 형태를 기준으로 볼 때, 노드 생존도가 링크 생존도보다 엄격한 망 성능지표임을 알 수 있다.

한편 단일 장애에 충분히 대비하기 위해서는 30%정도, 이중장애에 충분히 대비하기 위해서는 40~50%정도의 링크 추가가 필요함을 확인할 수 있다.

<표 3-1> 비용기준 망의 성능지표 (N=30)

노드수	링크수	망연결도	V ₁	V ₂	V ₃	S ₁	S ₂	S ₃
30	30	1.0	45.6	21.4	13.0	55.5	36.0	26.6
	40	1.0	53.1	28.9	17.8	58.6	40.3	28.8
	50	1.0	57.2	33.6	21.7	63.3	46.8	34.8
	60	1.0	60.0	37.7	25.5	69.8	53.8	43.9
	70	1.1	67.4	42.4	31.2	80.7	65.1	55.2
	80	1.2	74.7	49.5	37.0	82.9	75.3	68.3
	90	1.3	76.8	58.4	40.8	87.5	79.2	71.7
	100	1.4	83.3	64.3	49.2	90.1	82.1	78.2
	110	1.5	84.0	67.1	55.8	90.8	85.1	79.0
	120	1.5	85.2	71.9	58.1	92.0	89.6	84.3
	130	1.6	86.7	76.7	62.6	95.3	90.1	86.4
	140	2.2	91.4	80.2	65.4	98.0	94.0	91.4

<표 3-2> Degree기준 망의 성능지표 (N=30)

노드수	링크수	망연결도	V ₁	V ₂	V ₃	S ₁	S ₂	S ₃
30	30	1.0	45.6	21.4	13.0	55.5	36.0	26.6
	40	2.0	93.3	65.6	44.3	100.0	80.2	58.9
	50	3.0	93.3	86.9	67.9	100.0	100.0	87.5
	60	3.9	93.3	86.9	80.0	100.0	100.0	99.3
	70	4.0	93.3	86.9	80.6	100.0	100.0	100.0
	80	5.0	93.3	86.9	80.6	100.0	100.0	100.0
	90	5.4	93.3	86.9	80.6	100.0	100.0	100.0
	100	6.0	93.3	86.9	80.6	100.0	100.0	100.0
	110	7.0	93.3	86.9	80.6	100.0	100.0	100.0
	120	7.3	93.3	86.9	80.6	100.0	100.0	100.0
	130	8.0	93.3	86.9	80.6	100.0	100.0	100.0
	140	9.0	93.3	86.9	80.6	100.0	100.0	100.0

<표 3-3> 랜덤방식 망의 성능지표 (N=30)

노드수	링크수	망연결도	V ₁	V ₂	V ₃	S ₁	S ₂	S ₃
30	30	1.0	48.5	24.3	13.7	55.9	36.6	27.0
	40	1.0	82.2	60.6	39.8	88.4	75.5	63.5
	50	1.0	86.3	72.1	56.9	92.7	85.2	76.6
	60	1.4	88.8	77.7	65.3	95.3	90.1	85.2
	70	1.6	90.1	80.1	68.5	96.6	92.7	88.3
	80	2.0	92.0	81.3	71.3	98.6	94.0	91.4
	90	2.5	93.3	83.1	75.3	100.0	96.0	94.0
	100	2.8	93.3	83.8	76.5	100.0	96.6	95.3
	110	3.4	93.3	86.2	77.1	100.0	99.3	96.0
	120	4.1	93.3	86.9	78.9	100.0	100.0	98.0
	130	4.2	93.3	86.9	78.9	100.0	100.0	98.0
	140	4.9	93.3	86.9	80.0	100.0	100.0	99.3

<표 3-4> 비용기준 망의 성능지표 (|N|=50)

노드수	링크수	망연결도	V ₁	V ₂	S ₁	S ₂
50	50	1.0	52.4	23.9	60.8	41.1
	60	1.0	54.2	26.5	61.3	41.7
	70	1.0	55.9	27.6	61.3	43.1
	80	1.0	57.7	33.2	61.6	45.7
	90	1.0	58.8	35.4	63.6	47.8
	100	1.0	61.8	40.0	72.4	52.3
	110	1.0	63.8	43.9	73.9	57.0
	120	1.0	69.6	49.5	76.3	64.1
	130	1.0	71.0	50.5	76.6	67.8
	140	1.1	78.3	52.4	83.6	72.8
	150	1.2	80.1	57.4	85.5	79.7

<표 3-5> Degree기준 망의 성능지표 (|N|=50)

노드수	링크수	망연결도	V ₁	V ₂	S ₁	S ₂
50	50	1.0	52.4	23.9	60.8	41.1
	60	1.9	94.5	66.3	98.5	74.3
	70	2.0	96.0	76.8	100.0	85.9
	80	3.0	96.0	92.0	100.0	100.0
	90	3.0	96.0	92.0	100.0	100.0
	100	3.9	96.0	92.0	100.0	100.0
	110	4.0	96.0	92.0	100.0	100.0
	120	4.0	96.0	92.0	100.0	100.0
	130	5.0	96.0	92.0	100.0	100.0
	140	5.0	96.0	92.0	100.0	100.0
	150	5.3	96.0	92.0	100.0	100.0

<표 3-6> 랜덤방식 망의 성능지표 (|N|=50)

노드수	링크수	망연결도	V ₁	V ₂	S ₁	S ₂
50	50	1.0	48.5	24.4	56.6	38.9
	60	1.0	80.9	60.1	85.7	69.1
	70	1.0	89.1	75.3	92.9	83.2
	80	1.0	90.6	80.0	94.4	88.1
	90	1.1	92.1	81.7	96.0	89.9
	100	1.1	92.4	84.2	96.4	91.8
	110	1.2	92.8	85.3	96.8	93.3
	120	1.4	93.6	87.1	97.6	94.8
	130	1.6	94.4	88.2	98.4	96.0
	140	1.9	95.2	88.6	99.2	96.4
	150	1.9	95.2	88.6	99.2	96.4

다음으로 <표 3-7>과 <표 3-8>은 다중연결 통신망을 만들기 위한 목적으로 링크를 추가시켰을 때, 이에 수반되는 비용의 변화와 망 성능지표의 변화를 정리한 것이다. 노드수 30, 50, 70, 100인 경우를 대상으로 이중연결 망과 삼중연결 망을 작성해 보았으며, 사용되

어진 링크 추가 방법에 따라 구분하여 정리하였다. 이들 표에서는 모든 노드간의 연결만 가능하게 하는 데에 필요한 초기비용과, 이로부터 다중망을 구성하는 데에 필요한 추가 링크 설치비용(ΔC)을 성능지표의 변화와 더불어 같이 정리하였으므로, 망 성능 향상을 위한 비용효과를 분석해 볼 수 있다. 표에서 보는 바와 같이 비용기준 추가방식을 따라서 k -다중연결망을 구성하는 경우, 비용면에서는 가장 효율적이지만 결과적으로 나타나는 k -링크 생존도는 전반적으로 떨어짐을 알 수 있다. 반면에 degree기준 추가방식은 망 구성비용의 증가를 수반하지만 전반적인 망의 생존도를 높여주는 것으로 나타났다. 한편, 랜덤방식에 따른 결과는 망의 설계나 확장시에 체계화된 과학적인 접근방법의 중요성을 간접적으로 보여주고 있다.

<표 3-7> 링크 추가 방식에 따른 비용 및 망 성능 지표의 비교 ($k=2$ 인 경우)

N	초기 비용	비용기준 링크 추가				Degree기준 링크 추가				랜덤 방식 링크 추가			
		링크수	ΔC	V_2	S_2	링크수	ΔC	V_2	S_2	링크수	ΔC	V_2	S_2
30	3773.8	43.6	2895.9	32.5	70.4	33.3	3066.0	46.9	68.8	41.7	8395.4	30.4	85.3
50	4767.9	73.9	3648.8	43.2	77.4	55.5	4083.1	64.2	81.2	67.3	10575.7	29.7	87.0
70	5670.1	102.6	4076.3	44.0	74.8	77.6	5526.1	66.4	83.5	93.8	14531.7	31.6	89.9
100	6821.8	146.3	4799.0	40.9	70.5	111.7	7513.2	78.3	88.2	136.7	19971.1	36.5	94.0

<표 3-8> 링크 추가 방식에 따른 비용 및 망 성능 지표의 비교 ($k=3$ 인 경우)

N	초기 비용	비용기준 링크 추가				Degree기준 링크 추가				랜덤 방식 링크 추가			
		링크수	ΔC	V_3	S_3	링크수	ΔC	V_3	S_3	링크수	ΔC	V_3	S_3
30	3773.8	58.6	6463.5	29.9	84.3	45.1	10098.0	64.8	90.7	61.9	20630.8	25.1	93.4
50	4767.9	97.5	7672.9	38.7	89.2	75.0	15314.0	78.9	96.0	103.8	30209.5	24.6	96.0
70	5670.1	136.2	8941.4	43.7	92.8	105.5	21055.1	85.7	96.3	145.9	43373.1	26.3	97.1
100	6821.8	193.5	10341.7	45.7	91.4	150.7	28868.4	89.5	97.5	209.4	57994.8	30.0	98.0

3.4 망 성능지표를 감안한 망 설계 방법론의 정리

본 절에서는 2장의 망 성능지표 산출방법 및 3장에서 시험결과를 토대로 하여, 이러한 지표들에 대한 제한조건을 가지는 망 설계방법론을 정리해 보고자 하였다. 일반적으로 이러한 망 설계방법론들은 수리적으로 복잡한 모형이 되어서 최적해를 도출하는 것이 용이하지 않으며, 현실적으로 적절한 수준의 적정해를 도출하는 휴리스틱을 개발하는 것이 의미있게 된다.

엄밀한 의미의 생존도 반영 망설계는 노드간 연결도, 정량적 노드 생존도, 링크 생존도를 모두 반영할 수 있어야 할 것이다. 이러한 개념은 아래의 수리적 모형으로 나타낼 수

있다. 이는 Monma등(1992)의 망 연결도 모형과 Myung등(1999)의 링크 생존도 모형을 합친 개념이다.

$$\begin{aligned} & \text{Minimize} && \sum_{i,j \in E} c_{ij} x_{ij} \\ & \text{Subject to} && x(\delta(W)) \geq \max\{r_{st} | s \in W, t \in V \setminus W\}, \text{ for all } W \subset V & (1) \\ & && x(\delta(W)) \geq \begin{cases} k, & \text{if } t(W) \leq t(1 - S_k) \\ k+1 & \text{otherwise} \end{cases} & (2) \\ & && x_{ij} \in \{0, 1\} \end{aligned}$$

여기서 t 는 망에 요구되는 전체 서비스 요구량을 나타내며, $t(W)$ 는 노드집합 W 에 연결되는 서비스 요구량을 나타낸다.

정확한 해를 구한다는 시각에서 이 모형이 완전하지는 않다. 그러나 망 연결도 조건을 첫 번째 제약식으로 표현할 수 있으며, 정량적 노드 생존도와 링크 생존도는 두 번째 제약식으로 나타낼 수 있으므로, 생존도 모형의 개념적인 기준은 될 수 있다. 결국 모형에 표현된 바와 같이 제약식의 수가 너무 많으므로, 현재 상태에서 최적해를 얻기 위한 시도는 무리라고 할 수 있다. 따라서 적절한 휴리스틱으로 현실적인 해를 구하고, 구해진 망에서 요구되는 제약이 만족되는지를 검토하는 방법이 사용되어야 할 것이다. 최근에 국내연구진에 의하여 정량적 링크생존도를 감안한 비용 효율적인 망설계 모형이 정형화되었으며, 휴리스틱 해법이 제시되어 있다(Myung, Kim, Tcha, 1999). 그 해법 역시 3.3절에 제시된 링크 추가 방식의 개념을 활용하여 반복적으로 망을 확장시키는 절차를 따르고 있다. 특히 비용기준 방식이 전체 망 구축비용의 최적화에 가장 유리하다는 결과를 제시하고 있다. (<표 3-7>, <표 3-8> 결과와 비교 참조).

결국 정량적 생존도를 감안한 망 설계문제에 대하여 최적해를 도출하기 위한 해법을 얻기에는 많은 추가적인 연구가 필요하며, 현실에서 사용할 수 있는 적정해(비용 및 망 성능의 면)를 얻기 위한 방법으로 Add-Drop방식의 휴리스틱이 사용될 수 있다. 그리고, 중간 단계에서 링크 추가를 위한 특징적인 방법으로 본 연구에서 제시된 비용기준 방식, degree 기준 방식이 활용될 수 있을 것이다. 다만, 보다 정교한 설계방법론의 정립을 위하여 (1), (2) 제약식을 보완 또는 대체할 수 있는 수리적 특성의 연구가 지속적으로 이루어져야 할 것이다.

IV. 요약 및 결론

본 연구에서는 변화하는 통신기술 환경에서의 광대역 통신망이 갖추어야 할 새로운 망 성능지표로서 정량적 생존도의 개념을 정리·분석하였다. 2장에서의 개념정의와 더불어 망 연결도, 정량적 노드 생존도, 정량적 링크 생존도 등을 대상으로 그 포괄적 의미, 산출방법 등을 체계화하였다. 또 이들 지표의 실제적인 특성을 분석하기 위하여 랜덤하게 작성된 망을 대상으로 지표들을 산출해 보았다. 이 과정에서 망 확장시에 적용될 수 있는 링크 추가 방식을 제안하였고, 방법들의 특성을 정리하였다.

시험적용 결과를 통하여, 망 연결도의 개념과 정량적 생존도의 개념에는 현격한 차이가 있음을 알 수 있었다. 또한 임의적인 망 확장을 통하여서는 적정 성능의 망을 구성할 수 없음도 확인하였다. 나아가 링크 추가방식에 따른 지표 변화의 특성을 파악해 봄으로써, 향후 보다 체계화된 망 설계 및 망 확장방법론 연구의 기반을 마련하였다 할 수 있겠다.

다만, 본 연구에 사용되어진 시험망의 작성 방법론이 수리적 최적의 개념을 달성하지 못하고, 휴리스틱 방법론과 열거적 방법론에 근거하였다는 점에서 현실망의 세밀한 분석 또는 확장문제에 적용되기에는 한계가 있다. 향후 보다 체계적인 방법론의 마련과 수리적으로 정교하고 효율적인 해법의 연구가 필요하다고 하겠다.

<참고문헌>

- [1] Ahuja, R. K., T. L. Magnanti and J. B. Orlin, *Network Flows*, Prentice-Hall, Inc. (1993).
- [2] Brush, G. G. and N. A. Malrow, "Assuring the dependability of telecommunications networks and services," *IEEE Network Magazine* (1990) 29-34.
- [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] Garey M. R. and D. S. Johnson, *Computers and intractability*, Bell Telephone Laboratories (1979).
- [5] 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.
- [6] Kim, H. J., "A computation procedure for the k-link survivability," *Journal of Management* (University of Ulsan) 5 (1998) 1-16.
- [7] Monma, C. L., and D. F. Shallcross, "Methods for designing communications networks with certain two-connected survivability constraints," *Operations Research* 37 (1989) 531-541.
- [8] Myung, Y. S., H. J. Kim and D. W. Tcha, "Design of communication networks with survivability constraints," *Management Science* 45 (1999) 238-252.
- [9] 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.
- [10] Satyanarayana, A. and M. K. Chang, "Network reliability and the factoring theorem," *Networks* 13 (1983) 107-120.
- [11] Shay, W. A., *Understanding Data Communications and networks*, PWS, 1995.
- [12] Wu, T., D. J. Kolar and R. C. Cardwell, "Survivable network architectures for broad-band fiber optic network: model and performance comparison," *J. Lightwave Tech.* 6 (1988) 1698-1709.
- [13] Wu, T., *Fiber network survivability*, Artech House, Inc. (1992).