신뢰성응용연구 신뢰성기술
제8권, 제4호. pp.181-192, 2008

비가략(非可略) 구조를 갖는 네트워크의 단점간 가용도 평가

이 준 혁, *김 경 목, **오 영 환

한국정보통신기능대학 정보통신설비과, *삼육보건대학 의료정보시스템과, **광운대학교 전자통신공학과

Terminal-Pair Availability Evaluation in Irreducible Structure Communication Networks

Jun-hyuk Lee, *Kyoung-mok Kim, **Young-hwan Oh

Department of Information & Communication, Korea Information & Communication Polytechnic College
*Department of Medical Information System, Sahmyook Health College
**Department of Electronics & Communications Engineering, Kwangwoon University

Abstract

In this paper, we proposed effective algorithm that do Availability of communication network account using total probability formula. Use path tracing method about PSTN linked with MSC in WCDMA considering occasion that do not consider mobility of terminal and Availability did account. First, express minimum path series gathering by structure function after network that do modeling by stochastic graph for communication network saves all minimal path sets between particular two abutments and . we gain Availability value in angular variable after express structure function by Boolean operation form and Availability between two abutments did account.

Key words : path tracing method, total probability formula, Availability

1. 서론

유선망에서는 통신국과 통신국간 또는 단말(Terminal)과 단말간의 통신이 이루어 질 때 통신망의 성능지표(Performance)의 하나로 가용도(Availability)를 평가하게 된다[1]-[5]. 가용도란 수리 가능한 부품 또는 시스템이 특정한 환경에서 주어진 일정 시간 동안 요구되는 기능 또는 동작을 수행할 확률을 말한다[6]. 최근 통신기술의 고도화 및 통신망 사용자

의 증가로 인하여 시스템의 하드웨어적인 성능과 규모가 점점 커고 있다. 이에 따라 시스템의 가용도 요구는 시스템의 공급자 측면뿐만 아니라 시스템을 이용하는 가입자 측면에서도 그 중요성이 계속해서 증대 하고 있다[7]-[9]. 가용도 분석을 해야 할 시스템에 따라서는 시스템을 분해하여 몇 개의 하부 시스템이나 부품들로 나누었을 때 그 가용도 구조가 직렬과 병렬 구조의 반복 구조가 아니기 때문에 더 이상 간단한 구조로 간략화 될 수 없는 구조가 있다. 이런 구조를 비가략 구조(irreducible structure)라고 하고, 비가략 구조의 통신망은 직렬과 병렬 부품들의 가용도 등가를 축차적으로 구하여 나가는 방법을 사용할 수 가 없다[10].

본 논문에서는 단말의 이동성을 고려하지 않는 고정된 복잡한 구조를 갖는 통신망에서 최소경로집합(Minimal Path Set)을 이용하여 효과적인 가용도 계정 알고리즘을 제안하였다. 가용도 계정의 계산 실예를 WDMA 네트워크와 연결되는 일반적인 유선망인 공중 전화망(Public Switching Telephone Network)을 이용하였다.

본 논문의 세부 구성은 다음과 같다. 제 2장에서는 시스템 구조 및 가용도 등에 관한 이론을 소개하고, 제 3장에서는 통신망의 그래프 성질 및 구조를 설명하고, 제 4장에서는 가용도 계정 알고리즘을 제안하고, 제 5장에서는 가용도 계정과 가용도 계정의 계산 실예를 들고, 제 6장에서 결론을 맺는다.

2. 관련이론

2.1 시스템 가용도

2.1.1 구조함수

n 개의 구성품으로 구성된 수리 가능한 시스템을 n 차 시스템이라고 표현한다. 구성품들은 1부터 n으로 연속적으로 번호가 부여된다고 가정한다. 구성품 i (i=1, 2, ..., n)의 상태는 2진 변수 X_i로 표현할 수 있다.

즉,

$$X_i = \begin{cases} 1 & \text{구성품 } i\text{가 동작} \\ 0 & \text{구성품 } i\text{가 고장} \end{cases} \tag{2.1}$$

$X = (X_1, X_2, \cdots, X_n)$을 상태 벡터라고 하고, 모든 구성품의 상태와 시스템의 동작 여부를 알고 있다고 가정한다. 마찬가지로 시스템의 동작 상태도 2진 함수로 표현할 수 있다.

$\varnothing(X) = \varnothing(X_1, X_1, \ldots, X_n)$

여기서,

$$\varnothing(X) = \begin{cases} 1 & \text{시스템이 동작} \\ 0 & \text{시스템이 고장} \end{cases} \tag{2.2}$$

그리고 $\varnothing(X)$는 시스템의 구조 함수 또는 구조라고 한다.

시간 t에서 n 개의 구성품으로 구성된 시스템의 상태 변수들은 다음과 같다.

$X_1(t), X_2(t), \ldots , X_n(t)$: 상태 변수,

$X(t) = (X_1(t), X_2(t), \ldots , X_n(t))$: 상태 벡터

$\varnothing(X(t))$: 구조 함수

여기서

$$P_r(X_i(t) = 1) = A_i(t) \quad \text{for} \quad i = 1, 2, \ldots, n \tag{2.3}$$

$$P_r(\varnothing(X(t) = 1) = A_s(t) \tag{2.4}$$

상태 변수 $X_i(t)$는 2진 변수 이므로

$$E[X_i(t)] = 0 \bullet P_r(X_i(t) = 0) + 1 \bullet P_r(X_i(t) = 1) \tag{2.5}$$

$$= P_r(X_i(t) = 1) = A_i(t) \quad \text{for} \quad i = 1, 2, \ldots, n$$

이다.

따라서 시간 t에서 시스템 가용도 $A_s(t)$는,

$$A_s(t) = E(\varnothing(X(t) = 1)) = E(\varnothing(X(t))) \tag{2.6}$$

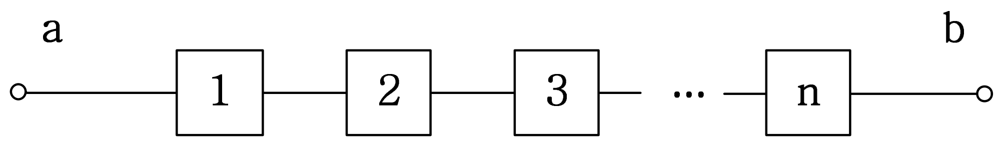
이다.

2.1.2 직렬 구조 가용도

n 개의 구성품 모두 동작할 때 시스템이 동작하는 것을 직렬 구조라고 한다. 구조함수는 다음과 같다.

$$\varnothing(X) = X_1 \bullet X_2 \cdots X_n = \prod_{i=1}^{n} X_i \tag{2.7}$$

n 차 직렬 구조를 그림 1과 같이 가용도 블록 다이어그램으로 표현하였다.



<그림 1. 직렬 구조의 가용도 블록 다이어그램>

a와 b 사이의 연결은 “구조가 동작한다.”라고 해석한다.

그림 1과 같이 시간 t에서 n 개의 구성품으로 구성된 직렬 구조의 구조 함수 $\varnothing(X(t))$는

$$\varnothing(X(t)) = X_1(t) \bullet X_2(t) \cdots X_n(t) = \prod_{i=1}^{n} X_i(t) \tag{2.8}$$

이다.

그러므로 직렬 구조의 가용도는 식 (2.8)에 의하여

$$A_s(t) = E(\varnothing(X(t))) = E\left(\prod_{i=1}^{n} X_i(t)\right) = \prod_{i=1}^{n} E(X_i(t)) = \prod_{i=1}^{n} A_i(t) \tag{2.9}$$

이다.

여기서 $A_s(t) \le \min_{i}(A_i(t))$

즉, 직렬 구조의 가용도는 가장 작은 가용도를 갖는 구성품보다 작거나 같다. 구조 함수를 사용 안한 직렬 구조의 가용도 표현은

$$A_s(t) = P_r(E_1(t) \cap E_2(t) \cap \cdots \cap E_n(t)) \tag{2.10}$$

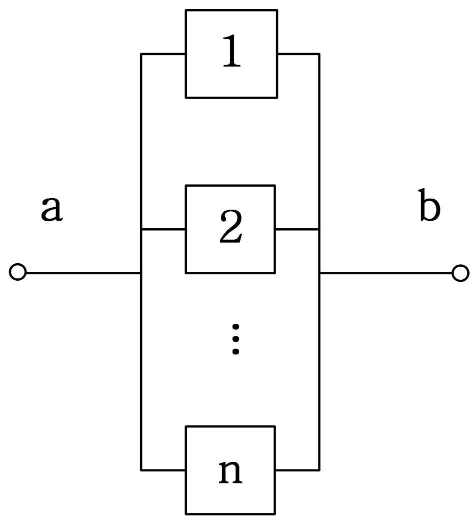
$$= P_r(E_1(t)) \bullet P_r(E_2(t)) \cdots P_r(E_n(t)) = \prod_{i=1}^{n} A_i(t)$$

이며, 식 (2.9)과 일치한다.

여기서, $X_i(t)$: 시간 t에서 구성품 i가 동작하는 사건

2.1.3 병렬 구조 가용도

n 개의 구성품 중 적어도 한 개가 동작할 때 시스템이 동작하는 것을 병렬 구조라고 한다. n 차 병렬 구조를 그림 2와 같이 가용도 블록 다이어그램으로 표현하였다.



<그림 2. 병렬 구조의 가용도 블록 다이어그램>

이 경우의 구조 함수는 다음과 같다.

$$\varnothing(X) = 1-(1-X_1)(1-X_2)\cdots(1-X_n) = 1-\prod_{i=1}^{n}(1-X_i) \quad (2.11)$$

위 식의 우측을 $\coprod_{i=1}^{n} X_i$로 표시하기도 한다. 여기서 $\coprod$는 “ip"라고 읽는다. 따라서 2차 병렬 구조의 구조함수는

$$\varnothing(X_1, X_2) = 1-(1-X_1)(1-X_2) = \coprod_{i=1}^{2} X_i \quad (2.12)$$

위 식의 우측은 $X_1 \coprod X_2$로 표시할 수 있다.

$$\varnothing(X_1, X_2) = X_1 + X_2 - X_1 X_2 \quad (2.13)$$

X_1, X_2가 2진 변수이므로 $X_1 \coprod X_2$는 X_i의 최대값과 같을 것이다. 마찬가지로

$$\coprod_{i=1}^{n} X_i = \max_{i=1,2,\ldots n} X_i \quad (2.14)$$

이다.

그림 2와 같이 시간 t에서 n 개의 구성품으로 구성된 병렬 구조의 구조함수 $\varnothing(X(t))$는

$$\varnothing(X(t)) = 1-(1-X_1(t))(1-X_2(t))\cdots(1-X_n(t)) \quad (2.15)$$

$$= 1-\prod_{i=1}^{n}(1-X_i(t)) = \coprod_{i=1}^{n} X_i(t)$$

이다.

시간 t에서 병렬 구조의 가용도는 식 (2.14)에 의하여

$$A_s(t) = E(\varnothing(X(t))) = 1-\prod_{i=1}^{n}(1-E(X_i(t))) \quad (2.16)$$

$$= 1-\prod_{i=1}^{n}(1-A_i(t)) = \coprod_{i=1}^{n} A_i(t)$$

이다.

구조 함수를 사용 안한 병렬 구조의 가용도 표현은

$$1-A_s(t) = P_r(E_1^*(t) \cap E_2^*(t) \cap \cdots E_n^*(t)) \quad (2.17)$$

$$= P_r(E_1^*(t)) \bullet P_r(E_2^*(t)) \cdots P_r(E_n^*(t)) = \prod_{i=1}^{n}(1-A_i(t))$$

이며, 식 (2.15)과 일치 한다. 여기서, $E^*{}_i(t)$: 시간 t에서 구성품 i가 고장 상태인 사건

2.2 복잡한 구조 가용도

n 개의 구성품으로 구성된 n 차 구조에서 구성품의 집합은 다음과 같이 표현한다.

$$C = \{1, 2, ..., n\}$$

경로집합(Path Set) P는 C의 구성품 집합으로 고장 없이 동작하여 시스템의 동작을 보장한다. 경로집합 중에서 시스템의 동작 상태를 유지하는 최소의 집합을 최소경로집합(Minimal Path Sets)이라고 한다.

컷 집합(Cut Set) K는 C의 구성품 집합으로 고장시 시스템의 고장을 야기 시킨다. 컷 집합 중에서 시스템의 고장 상태를 야기 시키는 최소의 집합을 최소 컷 집합(Minimal Cut Sets)이라고 한다.

$P_1, P_2, ..., P_p$의 최소경로집합과 $K_1, K_2, ..., K_p$의 최소 컷 집합으로 구성된 복잡한 구조에서 $\rho_j(X)$을 P_j의 구성품이 직렬 구조로 구성된 구조 함수로 표현하고 j개의 최소경로 직렬구조라고 한다.

$\rho_j(X)$는 다음과 같이 표현한다.

$$\rho_j(X) = \prod_{i \in P_j} X_i \quad 여기서\ j = 1, 2, ..., s \tag{2.18}$$

그리고 $\varnothing(X)$을 P_j의 구성품이 병렬 구조로 구성된 구조 함수로 표현하고 j개의 최소경로 병렬 구조라고 한다. $\varnothing(X)$는 다음과 같이 표현한다.

$$\varnothing(X) = \coprod_{j=1}^{p} \rho_j(X) = 1 - \prod_{j=1}^{p} (1 - \rho_j(X)) \tag{2.19}$$

위 식에 의하여

$$\varnothing(X) = \coprod_{j=1}^{p} \prod_{i \in P_j} X_i \tag{2.20}$$

이다.

따라서 시간 t에서 n 개의 구성품으로 구성된 브리지 구조에 대한 가용도는 다음과 같다.

$$A_s(t) = E(\varnothing(X(t))) = \coprod_{j=1}^{p} \prod_{i \in P_j} X_i(t) = \coprod_{j=1}^{p} \rho_j(X(t)) = 1 - \prod_{j=1}^{p} (1 - \rho_j(X(t))) \tag{2.21}$$

3. 네트워크 모델 및 통신 구조

3.1 네트워크 모델

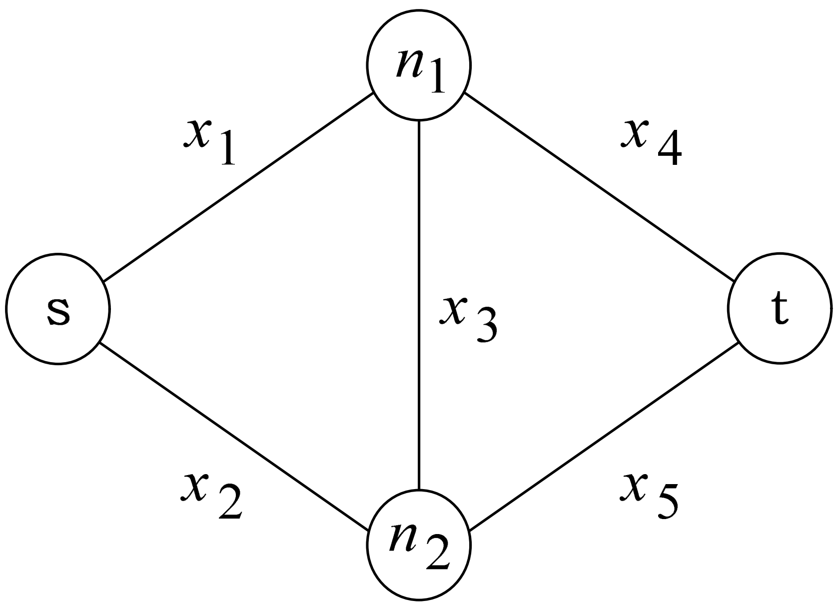
본 절에서는 단말의 이동성을 고려하지 않는 경우의 네트워크 가용도 계정을 위해 WCDMA 시스템의 MSC와 연동하는 PSTN 망에 연결된 단말로서 두 단점이 모두 고정 단말인 SS 구조에 대하여 논의하기로 한다.

3.1.1 통신망의 그래프 성질

PSTN 망은 일반적인 유선망으로서 두 단점 간에는 다양한 경로를 가지는 복잡한 구조의 형태로 되어 있다. 유선망은 무선망에 비해서 통신할 수 있는 가능성이 많은 반면 End-to-End 간 다양하고 복잡한 물리적 경로를 가지므로 이에 대한 논리적 모델을 이용한 경로에 대한 분석이 필요하다. 따라서 직렬과 병렬 형태의 단순 구조뿐만 아니라 복잡한 구조에 대한 해석이 필요하다. 본 논문에서는 복잡한 유선망에 대한 가용도 계정을 위해서 브리지 구조의 네트워크를 이용하였다.

브리지 구조의 네트워크는 그림 3과 같이 비방향성 확률적 그래프로 모형화 되는데, 모든 site s, n_1, n_2, t는 접합점을 표시하며, 특히 s를 소스 노드, t를 목적지 노드라고 한다. 각각의 site 간에 통신이 이루어진다면 링크는 접합점간에 존재하고 그렇지 않으면 존재하지 않는다.

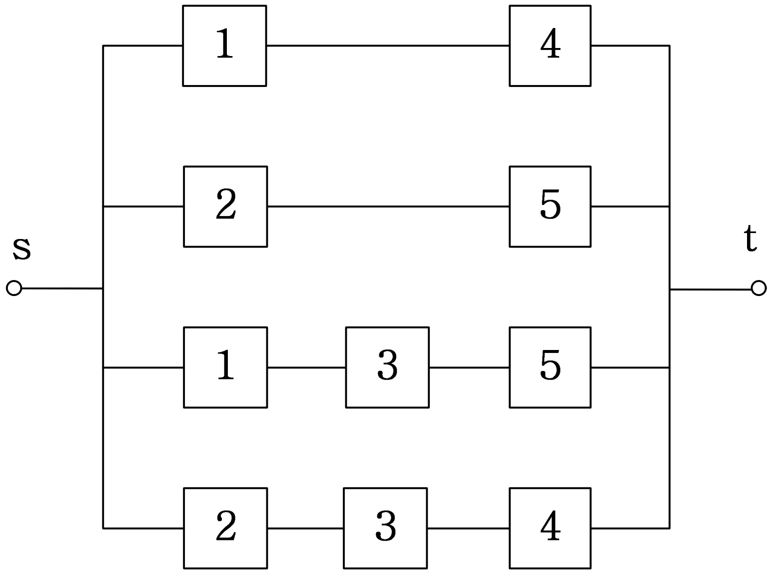
여기서 x_i는 그 값이 $\{0, 1\}$과 같은 논리 변수를 말하며, 접합점의 확률은 $p_{n_i} = P(n_i = 1)$, $q_{n_i} = P(n_i = 0) = 1 - p_{n_i}$로 규정한다. 그리고 p_{n_i}는 접합점 n_i가 동작하는 확률을, q_{n_i}는 그렇지 않을 확률을 의미한다. 링크의 확률은 $p_{x_i} = P(x_i = 1)$로 가정한다. 즉, 링크는 완전히 신뢰할 수 있다고 본다.



<그림 3. 브리지 구조 네트워크>

3.1.2 통신 구조

소스 노드와 목적지 노드 간에 구성될 수 있는 통신 구조는 SS 구조의 단일 구조이다. 앞의 문자는 소스 노드를 뒤의 문자는 목적지 노드를 말하며, S는 Static Host로서 PSTN 망에 연결된 일반적인 고정 단말을 의미한다. 소스 노드에서 목적지 노드로는 다양한 물리적 경로를 가진다. 그림 3을 블록 다이어그램으로 표현하면 다음과 같다.



<그림 4. 브리지 구조의 블록 다이어그램>

4. 통신망의 가용도 계정에 관한 알고리즘

단말의 이동성을 고려하지 않는 통신망의 가용도를 계정하기 위한 알고리즘을 다음과 같이 제안한다.

[단계 1] 주어진 네트워크의 확률적 그래프를 표현한다.

[단계 2] 두 단점간의 구성될 수 있는 통신 구조를 구분한다. 여기서는 단말의 이동성을 고려하지 않으므로 단일 구조이다. 즉 SS 구조 이다.

[단계 3] 특정한 두 접합점 간의 모든 최소경로집합(Minimal Path Set)을 구한다. 여기서, 최소경로집합이란 경로집합 중에서 시스템의 동작 상태를 유지하는 최소의 집합을 말한다.

[단계 4] 최소경로집합을 구조 함수로 표현한다.

[단계 5] 구조 함수에 대하여 각 변수에 대한 확률 값을 취한다.

[단계 6] 변수의 확률 값에 가용도를 대입하고 전 확률 공식을 이용하여 통신 구조에 대한 가용도를 계정한다.

5. 통신망의 가용도 계정

5.1 가용도 계정

4장에서 서술한 통신망의 가용도 계정 알고리즘에 따라서 네트워크 그래프 성질과 구조를 이용하여 다음과 같이 가용도를 계정한다. 단말의 이동성을 고려하지 않는 경우의 구조는 통신 상태는 한 가지이므로 정상 상태 확률 θ_a만 존재한다. 따라서 θ_a=1 이다.

그리고 조건부 확률을 적용하여 상태 확률 θ_a이 발생한 조건에서 상태 가용도 $A_{s|\theta_a}$을 구하기 위한 알고리즘은 다음과 같다.

[단계 3]에 의해 특정한 두 접합점 간의 모든 최소경로집합을 구한다.

먼저, 그림 4의 브리지 구조의 블록 다이어그램에서 접합점 s와 t 사이의 최소경로집합을 구하면 다음과 같다. 최소경로집합이란 경로집합 중에서 시스템의 동작 상태를 유지하는 최소의 집합을 말한다.

$$P_1 = \{1,\ 4\},\ \ P_2 = \{2,\ 5\},\ \ P_3 = \{1,\ 3,\ 5\},\ \ P_4 = \{2,\ 3,\ 4\} \tag{5.1}$$

여기서, 단순경로를 접합면만으로 표현한 것은 링크는 완전히 신뢰할 수 있다고 가정하였기 때문이다.

[단계 4]에 의해 각각의 최소경로집합을 구조함수로 표현하면 아래와 같다.

$$\begin{aligned} \rho_1(X(t)) &= X_1(t) \bullet X_4(t) \\ \rho_2(X(t)) &= X_2(t) \bullet X_5(t) \\ \rho_3(X(t)) &= X_1(t) \bullet X_3(t) \bullet X_5(t) \\ \rho_4(X(t)) &= X_2(t) \bullet X_3(t) \bullet X_4(t) \end{aligned} \tag{5.2}$$

4개의 최소경로집합을 최소경로직렬구조 $\rho_j(X)$ 표현하면 다음과 같다.

$$\rho_j(X) = \prod_{i \in P_j} X_i \quad \text{여기서 } j = 1,\ 2,\ 3,\ 4 \tag{5.3}$$

따라서 최소경로직렬구조의 구조 함수로 표현하면 $\varnothing(X)$는

$$\varnothing(X) = \coprod_{j=1}^{4} \rho_j(X) = 1 - \prod_{j=1}^{4}(1-\rho_j(X)) \tag{5.4}$$

이다.

위 식에 의하여

$$\varnothing(X) = \coprod_{j=1}^{4} \prod_{i \in P_j} X_i \tag{5.5}$$

가 된다.

$$\begin{aligned}\varnothing(X) &= \coprod_{j=1}^{4} \prod_{i \in P_j} X_i = \coprod_{j=1}^{4} \rho_j(X) = 1 - \prod_{j=1}^{4}(1-\rho_j(X) \\ &= 1-(1-\rho_1(X))(1-\rho_2(X))(1-\rho_3(X))(1-\rho_4(X)) \\ &= 1-(1-X_1X_4)(1-X_2X_5)(1-X_1X_3X_5)(1-X_2X_3X_4) \\ &= X_1X_4 + X_2X_5 + X_1X_3X_5 + X_2X_3X_4 - X_1X_3X_4X_5 \\ &\quad - X_1X_2X_3X_5 - X_1X_2X_3X_4 - X_2X_3X_4X_5 \\ &\quad - X_1X_2X_4X_5 + 2X_1X_2X_3X_4X_5\end{aligned} \tag{5.6}$$

[단계 5]에 의해 구조 함수에 대하여 가용도 값을 취하면

$$\begin{aligned}A_{s|\theta_a} = A_1A_4 + A_2A_5 + A_1A_3A_5 + A_2A_3A_4 - A_1A_3A_4A_5 - A_1A_2A_3A_5 \\ - A_1A_2A_3A_4 - A_2A_3A_4A_5 - A_1A_2A_4A_5 + 2A_1A_2A_3A_4A_5\end{aligned} \tag{5.7}$$

이다. 여기서 A_i, $i = 1, 2, 3, 4, 5$는 구성품의 가용도

[단계 6]에 의해 전 확률 공식을 이용하여 단말의 이동성을 고려하지 않는 경우의 시스템 가용도를 다음과 같이 구한다.

$$A_s = \sum_a A_{s|\theta_a} \cdot \theta_a \tag{5.8}$$

여기서,

A_s : 시스템 가용도

$A_{s|\theta_a}$: 상태 가용도

θ_a : 상태 확률, 여기서 θ_a=1

위의 식을 대입하여 정리하면,

$$A_s = \sum_a A_{s|\theta_a} \cdot \theta_a \tag{5.9}$$

5.2 가용도 계정 예

5.1에서 제안한 알고리즘을 실예에 의한 수치 계산을 통하여 확인 하도록 한다.
브리지구조 네트워크의 확률적 그래프에서 경로의 가용도를 다음과 같이 적용한다.

$$A_1 = A_2 = A_3 = A_4 = A_5 = 0.9$$

5.2에서 얻어진 가용도 계정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} A_s &= A_1A_4 + A_2A_5 + A_1A_3A_5 + A_2A_3A_4 - A_1A_3A_4A_5 - A_1A_2A_3A_5 \\ &\quad - A_1A_2A_3A_4 - A_2A_3A_4A_5 - A_1A_2A_4A_5 + 2A_1A_2A_3A_4A_5 \\ &= A^2 + A^2 + A^3 + A^3 - A^4 - A^4 - A^4 - A^4 - A^4 + 2A^5 \\ &= 2A^5 - 5A^4 + 2A^3 + 2A^2 \end{aligned}$$

여기서 가용도 값을 적용하면

$$\begin{aligned} A_s &= 2 \cdot 0.9^5 - 5 \cdot 0.9^4 + 2 \cdot 0.9^3 + 2 \cdot 0.9^2 \\ &= 0.97848 \end{aligned}$$

6. 결론 및 향후과제

본 논문에서는 전 확률 공식을 이용하여 통신망의 가용도를 계정하는 효과적인 알고리즘을 제안하였다.

단말의 이동성을 고려하지 않는 경우를 고려하여 WCDMA에서 MSC와 연결되는 PSTN 망에 대하여 경로 추적법을 이용하여 가용도를 계정하였다. 먼저, 통신망에 대한 확률적 그래프로 모형화한 네트워크를 두 개 의 특정한 두 접합점 간의 모든 최소경로집합을 구한 다음, 최소경로직렬집합을 구조 함수로 표현한다. 구조 함수를 논리식 형태로 표현한 후 각 변수에 확률 값을 취하여 두 접합점간 가용도를 계정하였다. 여기서 확률적 그래프의 링크는 완전하다고 가정하였다. 그러나 현실적으로는 그렇지 않다.

앞으로 더 연구하여할 과제로서는 단말의 이동성을 고려하지 않는 경우에 통신망의 노드 고장뿐만 아니라, 링크의 고장도 고려하여 네트워크의 가용도를 계정하는 연구가 필요하다고 사료된다.

참고문헌

[1] K. K. Aggarwal, J. S. Gupta, and K. B. Misra, "A simple method for reliability evaluation of a communication system," IEEE Trans. Commun., vol. 23, no. 5, pp. 563-566, May 1975.
[2] W. J. Ke and S.-D. Wang, "Reliability evaluation for distributed computing networks with imperfect nodes," IEEE Trans. Rel., vol. 46, no. 3, pp. 342-349, Sept. 1997.
[3] P. Kubat, "Estimation of reliability for communication/computer networks simulation/analytic approach," IEEE Trans. Commun., vol. 37, no. 9, pp. 927-933, Sept. 1989.
[4] S. M. Lee and D. H. Park, "An efficient method for evaluating network reliability with variable link capacities," IEEE Trans. Rel., vol. 50, no. 4, pp. 374-451, Dec. 2001.
[5] J. Shaio, "A family of algorithms for network reliability problems," in Proc. of 2002 IEEE Int. Conf. Communications, vol. 4, New York, Apr. 2002, pp. 2167-2173.
[6] Marvin Rausand and Arnljot HΦyland, System Reliability Theory Models, Statistical Methods, and Applications, Second Edition A John Wiley & Sons, Inc., 2004.
[7] Shanzhi Chen, Shiduan Cheng, Bin Chen, Junliang Chen, "Definitions of Restoration Mechanism Availability and Their Applications", Communications, 1997. ICC 97 Montreal, 'Towards the Knowledge Millennium'. 1997 IEEE International Conference on Vol. 1, 1997, pp. 283--287.
[8] Held M., Wosinska L., Nellen P.M., Mauz C., "Consideration of connection availability optimization in optical networks", Design of Reliable Communication Networks, 2003. (DRCN 2003). Proceedings. Fourth International Workshop on 2003, pp. 173--180.
[9] Laidevant D., Rambach F., Hoffmann M., "Availability of Connections in Ethernet over DWDM Core Networks", Transparent Optical Networks, 2007. ICTON '07. 9th International Conference on Vol. 4, 2007, pp. 24--27.
[10] 박경수, "신뢰도공학 및 정비이론", 탑출판사, 1978년.