

재경로 설정을 고려한 통신망의 신뢰도 분석 모델링

Reliability Analysis Modeling of Communication Networks Considering Rerouting

노철우
신라대학교

Cheul-Woo Ro(cwro@silla.ac.kr)

요약

본 논문에서는 통신망의 큐잉망 모델을 링크 고장을 고려한 신뢰도 모델과 함께 개발한다. 가상연결을 갖는 통신망에서 링크 고장시의 신뢰도 분석이 수행된다. 확장된 추계적 페트리 넷인 SRN은 시스템 분석을 위한 다양한 모델링 기능을 제공해 주며 적절한 보상율을 모델에 할당해 줌으로써 원하는 성능지표를 쉽게 구할 수 있다.

재경로를 갖는 신뢰도 분석을 위하여 모델 규격을 정하고 자동으로 모델을 생성하고 그 해를 구하는데 SRN 모델링이 적합함을 보여준다. 링크 고장에 따른 다양한 재경로 설정과 신뢰도 분석을 위하여 SRN을 이용한 마르코프 모델이 개발되고 그 해가 구해진다.

■ 중심어 : | 신뢰도 | 손실확률 | 페트리 넷 | SRN |

Abstract

In this paper, we develop queueing network models of communication networks with reliability model considering link failures. The reliability of a communication network with a virtual connection exposed to link failures is analyzed. Stochastic Reward Nets (SRN) is an extension of stochastic Petri nets and provides compact modeling facilities for system analysis. To get the performance index, appropriate reward rates are assigned to its SRN.

It is shown that SRN modeling is well suited to specify, automatically generate and solve for reliability under rerouting. Markov models using SRN are developed and solved to depict various rerouting caused by link failures and reliability analysis in communication networks.

■ keyword : | Reliability | Loss Probability | Petri Nets | SRN |

I. 서론

성능(performance), 신뢰도(reliability) 및 가용도(availability) 분석은 시스템의 동적 행동을 이해하기 위한 유용한 방법을 제공한다. 신뢰도 및 가용도 모델은 시스템 구조 및 구성요소의 고장(failure) 및 복구

(repair)에 근거한 시스템의 동적 행동을 분석하게 해주고, 성능 모델은 시스템이 고장나지 않는다는 가정 하에서 작동될 능력을 예측하게 해준다. 고전적인 성능분석에서는 시스템 고장을 고려하지 않았으나, 구성요소 중 일부가 고장나도 계속 작동될 수 있는 점진적인 기 능상실을 갖는 (gracefully degrading) fault-tolerant,

시스템에서는 성능과 신뢰도를 함께 고려할 수 있어야 한다[1].

신뢰도는 망을 유지/운영할 수 있는 능력의 척도로 주어진 시간 구간 $(0, t]$ 동안 연속적으로 망이 살아있을 확률로 정의한다. 망은 시간 $t=0$ 에서 살아 있으며(up) 주어진 노드 쌍에 대한 링크나 다른 경로가 연결되어 있으면 up되어 있는 것으로 가정한다.

링크 고장은 케이블 절단과 같은 하드웨어 고장뿐만 아니라 과도한 트래픽 폭주 등의 링크에서의 받아들일 수 없는 성능 때문에 발생할 수 있다. 본 논문에서는 링크 고장시 재경로 설정을 고려한 통신망의 성능 및 신뢰도를 분석한다. 성능 분석과 신뢰도 분석에 사용되는 비 상태 공간에 근거한 모델인 신뢰도 블록 다이어그램(reliability block diagrams), 고장나무(fault tree), 신뢰도 그래프 등은 구성요소간의 독립성이 존재할 경우 시스템의 고장과 복구를 표현할 수 있는 구체적인 방법을 제공한다[2]. 그러나 단일 복구 장비의 공유, 복구 될 구성요소의 우선 순위 부여와 같은 종속성, 동시성, 동기화 같은 능력에 제한이 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 상태공간에 근거를 둔 마르코프 모델과 추계적 페트리네트(Stochastic Petri Net:SPN)이 사용된다[3].

II. SRN

Stochastic Reward Nets (SRN) 모델은 SPN의 확장형으로, 가변 다중아크(variable multiplicity arc) 및 마킹종속(marking dependency) 기능들을 가지고 실제 복잡한 시스템의 모델링을 가능하게 해준다[4]. SRN은 SPN을 토대로 마르코프 모델을 자동으로 생성하며 또한 다양한 reward 함수를 정의할 수 있어 각종 관심있는 여러 종류의 성능지표를 표현 및 계산해 낼 수 있다. SPN은 마르코프 체인과 동형[5]이며 도달성 그래프로 나타나는 SPN의 상태는 마르코프 체인의 마킹 상태에 대응한다. 마르코프 체인의 각 마킹 상태에 대한 안정 상태 확률을 계산함으로써 SPN 모델의 해를 구할 수 있다. 마르코프 reward 모델인 SRN은 마르코프 체인

의 각 상태에 보상율(reward rate)을 결합시킴으로써 얻어진다. SRN으로 모델링된 시스템의 성능지표들은 보상율을 적절히 정의함으로써 마르코프 체인으로부터 구할 수 있다. SRN모델은 다음 단계에 의하여 해석적-수치적으로 해를 구한다[6].

첫째, 모델로부터 도달성 그래프가 생성되며 둘째, 도달성 그래프는 마르코프 reward 모델로 변환된다. 셋째, 마르코프 reward 모델은 수치적으로 해를 구하며, 마지막으로 구해진 해의 기대값으로 성능지표를 계산한다.

III. 시스템 모델링

1. 성능 모델

1.1 통신망 모델

통신망은 노드와 링크의 집합인 그래프로 표시될 수 있으며 본 논문에서는 하나의 VC에서 원천지 노드에서 목적지 노드까지의 패킷 전송을 위한 단순 또는 다중 경로의 라우팅을 고려한다. 통신망 모델은 포아송 분포의 외부 도착 시간과 지수 분포의 서비스 시간을 갖는 마르코프 체인으로 표현되며, 노드 i 와 j 사이의 라우팅은 시간에 독립적인 경로확률 q_{ij} 를 갖는 추계적 과정으로 묘사된다. 노드 용량은 큐 크기로 표현되며 큐 크기 n_i 를 갖는 각 노드의 도착률은 다음 식으로 표현되며 이 식은 오픈 BCMP 타입 큐잉망[9]과 같다.

$$\lambda_i = \sum_{j \neq i} q_{ij} \lambda_j (1 - \pi_j(n_j)) \quad (1)$$

여기서 $\pi_j(n_j)$ 는 노드 j 가 큐 크기 때문에 입력 패킷을 거절할 안정상태 확률이다.

각 노드는 M/M/1/k 큐잉 모델로 가정하며 각 노드가 갖는 패킷 수를 상태 x_i 로 정하고 각 노드의 도착률과 서비스율을 각각 λ_i, μ_i 라 하면 상태 x_i 에서의 노드 i 의 안정상태 확률은 다음 식으로 구해진다[7].

$$\pi_i(x_i) = \frac{1 - \rho_i}{1 - \rho_i^{n_i+1}} \rho_i^{x_i}, \quad \rho_i = \frac{\lambda_i}{\mu_i} \quad (2)$$

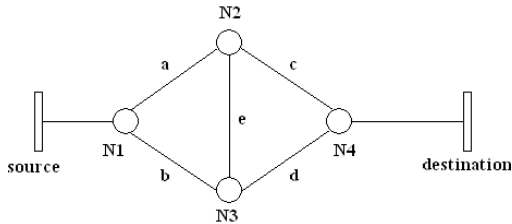


그림 1. 기본 통신망 구조

[그림 1]의 망은 노드 N_i , ($i=1,2,3,4$)와 각 노드간의 쌍으로 이루어지는 링크 a,b,c,d,e를 보여준다. VC1(virtual connection :가상연결)은 링크 a와 링크 c로 구성되어진다. 본 논문에서는 VC1에 대한 성능 및 신뢰도 분석을 수행한다. 링크 고장시 공유링크 e를 활용하며 재경로 설정으로 다른 VC의 링크인 b나 e를 이용한다.

1.2 큐잉망 SRN 모델

[그림 2]는 [그림 1] 통신망에 대한 SRN 모델이다. 시간천이 source에 의해 생성되는 토큰인 패킷은 1번 노드를 나타내는 장소 N1에 놓이게 되고 노드 1의 서버를 나타내는 시간천이 S1에 의해 서비스 즉 전송되어 노

드 2나 3으로 전송된다. 장소 N1에서 노드 1 서버의 큐로써 지정된 큐 크기(k)를 초과한 패킷은 분실된다. 큐 크기를 모델링 하기 위하여 시간천이 S1과 장소 N1 사이에 크기가 k인 다중금지 아크를 사용하며 큐 크기를 초과한 패킷 분실은 즉시 천이 loss1에 의하여 flush 즉 분실된다. 이는 loss1에 대한 가드함수로 장소 N1에 남아 있는 패킷 수가 큐 크기 k를 초과할 때 발사가능하도록 모델링 된다. 각 노드별로 같은 구조가 모델링된다. 공유 링크 e를 모델링 하기 위하여 양방향 전송을 위한 장소와 천이인 N51, N52, S51, S52를 추가 한다. 노드 라우팅은 각 노드의 경계에 있는 즉시 천이인 q_{ij} , ($ij=12, 13, 24, 23, 32, 34$)의 가드함수와 해당 천이의 확률 값으로 결정된다. 링크 고장시 대체경로를 찾는 재경로 설정역시 이들 즉시천이들의 가드함수로 수행된다.

```
guard(loss1, en_loss1);
en_loss1() {if #N1>=k return 1 else return 0;}
```

2. 링크 고장 및 신뢰도 모델

망에서 링크 고장에 대한 모델은 [그림 3]으로 링크의 정상 상태와 고장 상태를 나타내는 장소 linkUp_y, ($y=a,b,c,d,e$)와 linkDn_y 및 링크의 고장을 나타내는 시간천이인 IF_y로 모델링 된다. 시간천이는 각각 고장

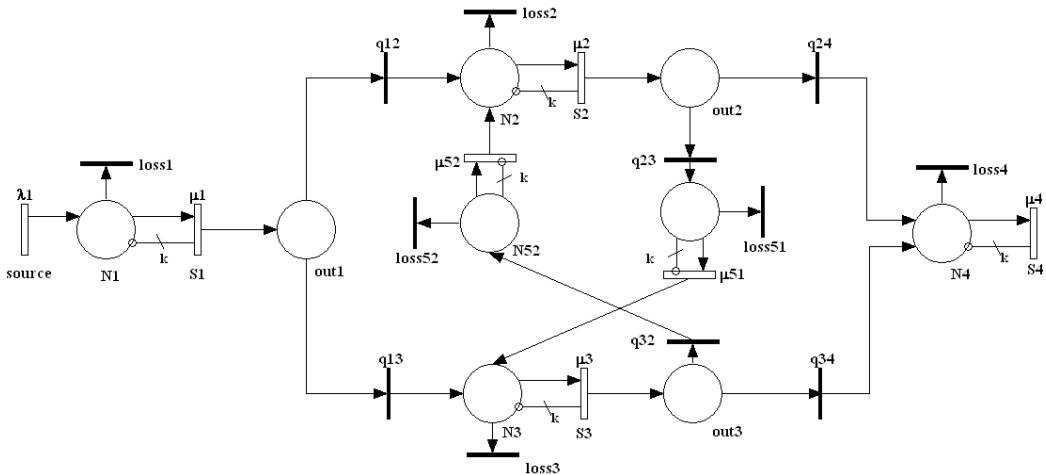


그림 2. 큐잉망 SRN 모델

시간을 가지고 고장 시나리오 따라 실행된다. 고장시나리오는 SRN 모델에서 init 함수를 이용하여 고장에 해당하는 링크의 상태를 up 또는 down으로 설정 시켜줌으로써 수행할 수 있다.

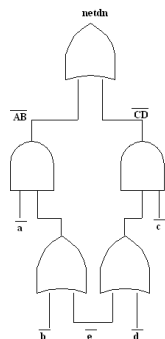
2.1 고장나무 신뢰도 모델

링크의 고장 및 복구는 up 및 down 상태로 나타내며 [그림 3(a)]의 고장나무로 링크 고장에 따른 통신망의 VC1에 대한 시스템 다운을 정의한다. 고장나무에서 OR/AND 게이트의 입력값 1은 해당 링크의 고장을 나타내며 \overline{AB} 또는 \overline{CD} 가 1이면 VC1에 대한 망은 다운된다.

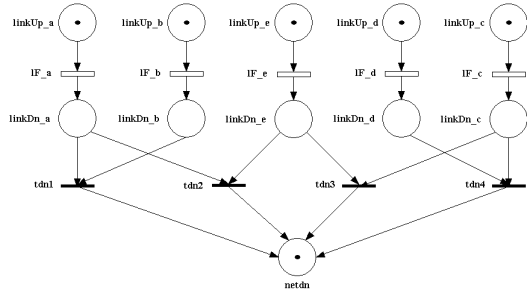
링크 a 고장시 재경로는 b-e가 된다. 이 경우 b나 e 둘 중 하나라도 고장나면 a에 대한 경로는 다운된다 ($\overline{AB} = \overline{a} \wedge (\overline{b} \vee \overline{e})$). 마찬가지로 c 고장시 e나 b 둘 중 하나라도 고장나면 ($\overline{CD} = \overline{c} \wedge (\overline{d} \vee \overline{e})$)에 대한 경로는 다운된다. \overline{AB} 나 \overline{CD} 둘 중 하나라도 1이 되면 VC1에 대한 망은 고장나는 것으로 정의한다. ($netdn = \overline{AB} \vee \overline{CD}$). 즉 링크 a와b, a와e, c와e, c와b 고장시 VC1에 대한 망의 다운을 정의하고 이에 대한 신뢰도를 구한다.

2.2 SRN 신뢰도 모델

링크 고장시 망은 재경로 설정을 수행하며 고장난 링크는 복구되지 않는다고 가정한다. 링크 a 고장시 b-e를 링크 c 고장시 e-d를 대체경로로 고려한다. 링크 e는 공유 링크가 된다. 링크고장은 [그림 3(a)]의 고장나무로 명세화 되며 시간 변화에 따른 신뢰도를 분석하기 위하여 [그림 3(b)]의 SRN 신뢰도 모델을 사용한다.



(a) 고장나무 모델



(b) SRN 모델

그림 3. 통신망(그림 1)의 신뢰도 모델

[그림 3(b)] SRN모델에서 장소 linkUp_x/linkDn_x, (x=a,b,c,d,e)은 해당 링크의 정상/고장 상태를 나타내고 시간천이 IF_x는 해당 링크의 고장 사건을 즉시천이 tdn_i, (i=1,2,3,4)는 두 링크의 동시 고장 사건을 나타낸다. 장소 netdn은 VC1에 대한 시스템 다운을 나타낸다. 즉 통신망의 비신뢰도는 장소 netdn에 토근이 존재할 확률로 구할 수 있으며 이는 시간 종속으로 시간이 변화함에 따른 값을 갖으며 복구가 없는 경우, 결국 시스템 다운인 0의 값을 갖게 된다. 장소 netdn에 의한 absorbing 마킹으로 종착되는 비신뢰도 값을 구할 수 있으며 1에서 이 값을 빼면 VC1에 대한 신뢰도 값을 구할 수 있다. [표 1]은 신뢰도를 구하기 위한 SRN 모델인 [그림 3(b)]를 부울함수로 표현한 것으로서 최종 G 값 1은 netdn을 의미한다.

표 1. 신뢰도 모델의 조건 함수

이름	부울 함수
AB	$(\#(\text{linkDn}_a) == 1) \wedge (\#(\text{linkDn}_b) == 1)$
AE	$(\#(\text{linkDn}_a) == 1) \wedge (\#(\text{linkDn}_e) == 1)$
CD	$(\#(\text{linkDn}_c) == 1) \wedge (\#(\text{linkDn}_d) == 1)$
CE	$(\#(\text{linkDn}_c) == 1) \wedge (\#(\text{linkDn}_e) == 1)$
G	$AB \vee AE \vee CD \vee CE$
reward 함수	
if (G== 1) then R = 0 else R=1	

마킹은 각 장소에 있는 토근 수에 대한 벡터로서 즉시천이에 대한 무형(vanishing) 마킹과 시간천이에 의

한 유형(tangible) 마킹으로 분류된다. [그림 4]에서 각 장소에 있는 토큰 분포는 마킹으로 표현된다. 링크 a와 b 고장시 초기마킹 M0은 (#(linkUp_a), #(linkUp_b), #(linkUp_c), ..) = (1100000000)으로 나타내지며 이를 단순화 해서 (linkUp_a, linkUp_b)로 표현한다. 초기 마킹으로부터 링크고장을 나타내는 천이에 의해 생성되는 마킹들의 집합을 도달성 그래프라 한다. [그림 4]는 링크 a, b 고장시 생성되는 도달성 그래프를 보여준다. 링크 a가 먼저 고장나면 천이 IF_a가 발생되어 마킹 M1이 생성되고 링크 b가 먼저 고장나면 천이 IF_b에 의해 마킹 M2가 생성된다. a 고장후 b가 고장나면 천이 IF_b에 의해 그 반대면 IF_a에 의해 무형 마킹 M3가 생성되며 생성된 M3는 바로 즉시천이 tdn1에 의해 최종마킹인 M4에 도달된다. 여기서 M3를 제외한 천이는 시간천이인 IF_a/IF_b에 의해 다음 마킹에 도달하는 유형 마킹이고 M3는 즉시천이에 의해 M4에 바로 도달되는 무형 마킹이다. 무형마킹인 M3는 M4에 합쳐지며 이는 해당 천이에 대한 발사비율로 나타내지는 마르코 프체인과 동형이 된다.

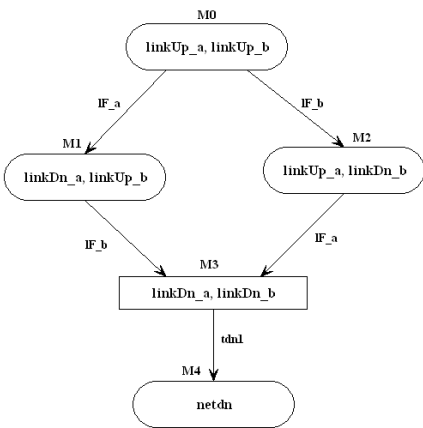


그림 4. 도달성 그래프(링크 a, b 고장)

2.3 재경로 설정

링크 고장시 재경로 설정은 [그림 2] 모델에서 경로 설정 천이인 q_{ij} 를 가드함수를 이용하여 [표 2]처럼 설정해준다. 여기서 1은 해당경로가 정상작동 중임을, 0은 고장임을 나타낸다.

표 2. 재경로 설정 리스트

링크 고장	재 경로	가드함수					
		q12	q13	q23	q32	q24	q34
정상VC1		1	0	0	0	1	0
a	b-e-c	0	1	0	1	1	0
c	a-e-d	1	0	1	0	0	0
a&c	b-d	0	1	0	1	0	1
a&b	netdn	0	0	0	0	1	0
a&e	netdn	0	1	0	0	1	0
c&d	netdn	1	0	1	0	0	0
c&e	netdn	1	0	0	0	0	0

링크 a나 c 하나만 고장 났을 경우는 공유경로로 설정되어 있는 링크 e로 재경로 되어 패킷 전송을 수행해 준다. a, c 둘 다 고장일 경우에는 다른 VC인 b-d 경로를 전부 이용해야 하는데, 패킷을 분실하더라도 이를 허용해 주지 않는 방법1과 허용해 주는 방법2를 고려한다.

링크 a가 먼저 고장난 경우 재경로로 b-e-c 경로가 설정된다. 그 다음 링크 c 고장일 경우 c의 재경로 설정에서 기본적으로 e-d경로를 찾는다. 방법1은 e-d 경로를 단절하는 방법이다. 첫 번째 재경로 설정에서 a 고장에 의해 링크 e를 이미 사용 중이므로 e-d 경로를 단절하고 링크 c의 시발점인 노드2에서 패킷을 분실하는 경로설정을 할 수 있으며 기존의 b-e-c 경로에서 c 고장 후 b-e로 경로가 끝나는 경우이다.

방법2는 링크 c 고장 후 e-d 경로가 이어지면 b-d 경로가 만들어져 재경로 설정이 되는 경우로 자신의 패킷 손실은 줄일 수 있으나 다른 VC에 부담을 주게 된다.

마찬가지로 링크 c가 고장난 후 a가 고장나는 경우도 방법1, 2를 고려할 수 있다. 링크 c 고장 후 재경로는 a-e-d로 설정될 것이며 이후 a가 고장나면 방법1은 a 고장에 의해 b-e경로를 찾지만 단절될 것이고 방법2는 b-d 경로를 허용해 주어 패킷을 전송할 수 있게 한다. 나머지 링크 고장인 경우는 방법2를 고려할 필요는 없다. [표 3]은 링크 고장의 케이스별 재경로 설정 단계를 설명한다.

표 2. 재경로 설정

링크고장	첫 번째 재경로	두 번째 재경로	
AC	a=>c	b-e-c 	방법1: b-e
			방법2: e-d, b-d
	c=>a	a-e-d 	방법1: e-d
			b방법2: e-d, b-d
AB	a=>b	b-e-c 	e-c
	b=>a	a-c(재경로설정안함) 	e-c
CD	c=>d	a-e-d 	a-e
	d=>c	a-c(재경로설정안함) 	a-e
CE	c=>e	a-e-d 	a
	e=>c	a-c(재경로설정안함) 	a

IV. 성능지표 및 수치결과

통신망에서의 기본 성능지표로는 각 노드의 큐 크기 제한에 따른 손실확률, 망의 각 노드에 머무는 평균 패킷 수, 망에서의 전송시간인 지연 등을 구할 수 있으며 이들 값은 전송 패킷의 송/수신율과 버퍼 크기에 따라 좌우된다. 망이 정상으로 작동시 이들 성능지표를 기본으로 구하고, 링크 고장시 서비스를 해주지 못함으로 발생하는 지연, 재경로에 의한 추가 패킷 발생과 지연/손실 등을 고려한 성능지표를 구한다. 또한 링크 고장시 결국 망이 다운될 경우를 가정한 통신망의 신뢰도를 구한다. SRN 모델에서는 각 장소의 상태를 나타내는 마킹에 적절한 보상율을 할당함으로써 원하는 성능지표를 얻을 수 있다. 수치결과에 사용하는 입력 매개변수로는 $n=3, \lambda=6, \mu_i=15 (i=1,2,3,4,5,1,5,2)$ 를 사용하였으며 각 천이의 발사시간인 패킷 발생 및 전송 시간은 포아송 분포와 지수 분포를 따르는 것으로 가정한다.

• 손실 확률

망에서 전송되는 패킷은 각 노드의 큐가 찼을 때 분실되며 모델에서 손실확률은 source에서 발생되어 실제 전송된 패킷 수 대비 최종 목적지 노드에서 실제 처리된 패킷 수의 비로 다음과 같이 구할 수 있다.

여기서 $rate(S4)$ 는 노드4의 서비스율 즉 실제 처리된 패킷 수를 나타낸다.

$$loss_pr = 1.0 - rate(S4)/rate(arrival)$$

손실 확률은 큐 크기에 따른 패킷 오버플로우에 의한 손실과 링크 고장시 재경로 수행에 따른 손실로 분류할 수 있다.

표 4. 손실확률 ($n=3, \lambda=6$)

λf	nofail/B	A / C	AB / AE	AC	CD / CE
0.001	0.08709	0.12093	0.10179	0.35563	0.10180
0.003	0.08709	0.14864	0.09288	0.13855	0.09290
0.005	0.08709	0.1542	0.08881	0.09377	0.08881
0.007	0.08709	0.15517	0.0876	0.08809	0.08760
0.009	0.08709	0.15534	0.08724	0.08729	0.08724

[표 4]는 링크고장율 λ_f 에 따른 손실확률을 보여준다. 고장이 없을 경우의 손실확률은 큐크기에 따른 손실확률을 나타내고 이 값과 나머지 고장발생시의 값과의 차이가 링크고장에 의한 재경로 설정시 발생하는 손실확률을 값이 된다.

λ_f 가 증가할수록 링크 a나 c 고장시 손실확률은 증가하나 링크 a,c 둘다 고장일 경우는 손실확률이 커졌다가 감소함을 알 수 있다. a,c 둘다 고장일 경우인 AC는 위 재경로 설정에서 언급한 방법1의 경우는 $\lambda_f=0.001$ 이면 0.70409의 값을, $\lambda_f=0.005$ 이면 0.98367의 값을 가진다. 즉 VC1 구성요소가 전부 고장시 타 VC를 전부 이용하는 것을 허용하지 않는다면 해당 VC에서의 대부분의 패킷은 손실됨을 알 수 있다. 또한 망 다운으로 정의한 링크 ab, cd, ce 둘 다 고장인 경우의 손실확률은 λ_f 가 증가해도 감소함을 보인다 (신뢰도 값은 감소한다). ab보단 cd, ce가 증가된 값을 갖는다.

• 지연

VC에서 패킷이 원천지에서 목적지까지 도착하는데 걸린 시간인 지연은 Little's result로부터 다음 식으로 구할 수 있다. M은 노드 수를 나타내고 $\#N_i$ 는 해당 노드의 평균 토큰 수 즉 평균 패킷 수를 나타낸다.

$$D = \sum_{i=1}^M \#N_i / \text{rate}(\text{arrival}) \quad (3)$$

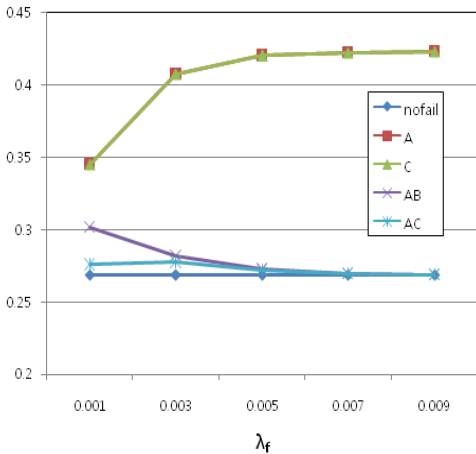


그림 5. 지연

[그림 5]는 링크 고장시 VC1에 대한 λ_f 에 따른 지연을 보여준다. 링크 a나 c 고장시(A,C) 지연과 평균 패킷 수는 증가함을 보이며 ab나 ac 두 링크가 다 고장시는 (AB,AC) 감소함을 보인다.

• 신뢰도

시스템이 다운될 확률인 비신뢰도는 시간 변화 함수로 SRN 모델에서 absorbing 마킹이 생기는 경우인 장소 netdn에 토큰이 존재할 확률로 구할 수 있으며 이는 다음 마킹함수로 구한다.

$$R(t) = \text{if}(\#netdn == 1) \text{ return } 0 \text{ else return } 1$$

위 식은 시간에 따라 변하며 신뢰도 값은 [그림 3]에서 정의한 시스템 다운의 경우는 시간이 지나면 0이 된다. [그림 8]은 임시상태분석으로 시간 변화에 따른 신뢰도를 보여준다. 망에서 고장난 링크에 대한 복구를 고려하지 않았기 때문에 신뢰도는 결국 0에 수렴하게 된다. 또한 λ_f 가 클수록 신뢰도 값이 감소함을 알 수 있다.

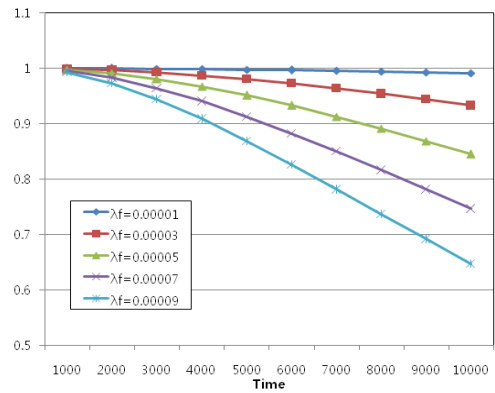


그림 6. 신뢰도

V. 결론

본 논문에서는 재경로 설정을 갖는 통신망에 대한 성능 및 신뢰도 분석 모델을 페트리 네트의 확장인 SRN을 이용하여 개발함으로써 SRN 모델링 기법이 모델 규격을 정하고 자동으로 마르코프 모델을 생성하고 그 해

를 구하는데 적합함을 보여주었다.

각 노드의 패킷 전송 및 큐를 기본으로 한 통신망 성능 모델과 링크 고장시 재경로 설정에 대한 신뢰도 모델을 SRN의 reward 및 가드 함수를 이용하여 개발하였다. 패킷 손실 확률과 링크 고장시 예견되는 신뢰도에 대한 수치결과를 안정상태와 시간에 따라 변화되는 임시 상태로 구분하여 구하였다. 망 고장시 신뢰도 분석은 망의 생존성[10][11]으로 확장되며 시간에 따른 생존성 분석을 향후 연구과제로 수행하고자 한다.

참 고 문 헌

[1] J. Meyer, "On evaluating the Performability of degradable Computing Systems," IEEE Transactions on Computers, C-29(8):720-731, 1980(8).

[2] R. A. Sahner and K. S.Trivedi, *Performance and Reliability Analysis of Computer Systems*, Kluwer Academic Publishers, 1996.

[3] M. A. Marsan, Conte, and Balbo, "A class of generalized stochastic petri nets for the performance evaluation of multiprocessor systems," ACM Trans. Computer Systwms, Vol.2, pp.93-122, 1984.

[4] G. Ciardo, J. Muppala, and K. Trivedi, "Analyzing concurrent and fault-tolerant software using stochastic reward nets," J. Parallel & Distributed Computing, Vol.15, pp.255-269, 1992.

[5] M. Molly, "Performance analysis using stochastic Petri nets," IEEE Trans. Computer, Vol C-31, pp.913-917, 1982(9).

[6] K. S. Ciardo, Trivedi, SPNP Users Manual, Duke University, 1994.

[7] K. S. Trivedi, *Probability and Statistics with Reliability, Queueing, and Computer Science Applications*. ISBN 0-471-33341-7. John Wiley

and Sons, 2nd edition, 2001.

[8] M. Malhotra and G. Ciardo, "Dependability Modeling Using Petri-Net," IEEE Transactions on Reliability, Vol.44, No.3, pp.428-440, 1995(9).

[9] F. Baskett, K. M.Chandy, "Open, closed, and mixed networks of queues with different classes of customers," J.ACM, Vol.22, No.2, pp.248-260, 1975.

[10] P. Heegaard, K. S. Trivedi, "Survivability Quantification of Communication Services," IEEE DSN 2008, Alaska, 2008(6).

[11] L. Yun and K. S. Trivedi, "Survivability Analysis of Telephone Access Network," International Journal of Performability Engineering, Vol.2, No.1, pp.29-44, 2006(1).

저 자 소 개

노철우(Cheul-Woo Ro)

중신회원



- 1980년 2월 : 서강대학교 물리학과(학사)
- 1982년 2월 : 동국대학교 전자계산학과(석사)
- 1995년 8월 : 서강대학교 전자계산학과(박사)

▪ 1991년 ~ 현재 : 신라대학교 컴퓨터정보공학부 정교수

<관심분야> : 이동통신 시스템, 통신 프로토콜 설계/검증/시험, 페트리 넷 모델링 및 성능, RFID, 임베디드 시스템