

DEVS 시뮬레이션을 이용한 패킷망의 모델링 및 성능분석*

Modelling and Performance Evaluation of Packet Network by DEVS Simulation

박상희**, 이왕재**, 이석필**, 지승도***

Sang Hui Park, Wang Jae Lee, Seok Pil Lee, Sung Do Chi

Abstract

Discrete event modeling is finding ever more application to analysis and design of complex manufacturing, communication, computer systems, etc. This paper shows how packet network systems may be advantageously represented as DEVS (Discrete Event System Specification) models by employing System Entity Structure / Model base (SES/MB) framework developed by Zeigler. DEVS models and network structure representations support a strong basis for performance analysis of packet network systems. This approach is illustrated in a typical packet network example with several routing strategies.

1. 서론

이산 사건 모델링(Discrete Event Modeling)은 복잡한 통신 시스템, 공장 자동화, 그리고 컴퓨터 시스템 등의 분석 및 설계 분야에 있어서 점증적 응용 추세를 보이고 있다. IEEE는 DEDS (Discrete Event Dynamic Systems) 특집 등을 통하여 이 분야의 중요성을 이미 인식시켜온 바 있으며 강력한 프로그램 언어의 개발 및 워크스테이션의 출현은 이산사건 모델링의 컴퓨터 시뮬레이션을 가속화시켰다. 그러나 이산 사건 시스템의 본질적 이해도는 연속 시스템 연구에 비해 아직도 유아 단계에 불과하다고 볼 수

있다[1].

Zeigler에 의해 개발된 DEVS 형식(discrete event system specification formalism)[11]은 이산 사건 모델들의 계층구조적 모듈화 방법을 제공해 준다. 역시 Zeigler에 의해 구현된 DEVS-Scheme[1][12]은 DEVS 형식과 그에 관련된 추상 시뮬레이터 개념을 PC-scheme(Texas Instrument, 1986)으로 구현한 것으로 DEVS의 모델링과 시뮬레이션을 위한 종합적 도구로서, 많은 학문적 업적 및 응용사례를 남겼다. DEVS-Scheme은 계층적이고도 모듈화된 이산 사건 시스템 시뮬레이션 모델들을 표현하는 DEVS 형식론에 근거를 두며, 기존의 시뮬레이션 언어인 SIMSCRIPT,

* 본 연구는 한국과학재단의 연구비 지원으로 이루어진 연구임을 알려드립니다.

** 연세대학교 전기공학과

*** 한국항공대학교 전자계산학과

SLAM, SIMAN 등과는 달리 DEVS 형식론의 이론을 바탕으로 계층구조적 모델링을 가능케한다.

한편, 컴퓨터 기술과 통신 기술이 고도로 발전함에 따라 각종 정보자원을 공유하고, 컴퓨터와 컴퓨터, 사용자와 컴퓨터, 사용자와 사용자 사이의 정보처리 및 통신, 신뢰성 향상, 처리 기능의 분산화 등을 목적으로 하는 컴퓨터 통신망이 지난 십 여년간 급속히 발전해오고 있다[2].

1960년대 초 군사용 음성통신회선의 도청방지를 위해 패킷교환의 개념이 등장하였고, 미 국방부의 ARPA(Advanced Research Project Agency)는 광범위한 지역에 설치된 컴퓨터들간의 자원 공유의 필요 때문에 패킷 교환기술을 이용하여 컴퓨터네트워크를 건설하였다. 이후 미니 컴퓨터 또는 마이크로 컴퓨터의 출현으로 컴퓨터 자원이 광범위하게 분산되어 상호 통신하고자 하는 요구를 발생시켰으며 이를 충족시키기 위해 패킷 교환 네트워크는 계속 발전하여 오늘날 컴퓨터를 이용한 데이터 통신에 가장 널리 사용되는 교환기술이 되었다[3].

통신망에 있어서 성능 분석이 필요한 이유는 기존 시스템을 서로 다른 조건하에서 분석, 비교함에 의해 성능을 향상시킬 수 있고, 새로운 시스템을 도입시에 필요한 유용한 자료를 제공할 수 있기 때문이다[4].

성능 분석 방법으로는 실측에 의한 방법, 수학적 모델링에 의한 분석적 방법, 시물레이션 모델에 의한 모의실험방법 등이 있는데, 본 연구에서는 DEVS 모델링에 의한 시물레이션 방법을 사용하였다. 그리고 시물레이션에는 DEVS-scheme이 사용되었다.

기존의 분석적 기법에 비해 시물레이션 기법은 특히 통신망의 설계에 있어서 매우 효과적인 도구로 인식되고 있다. 그 이유는 통신 시스템은 아주 복잡해졌으나 분석적인 방법의 적용은 비교적 단순하고도 이상적인 시스템에만 국한되어 있기 때문이다[5]. 복잡한 통신 시스템에 분석적인 방법을 사용하여 성능분석을 하는 것은 매우 힘들기 때문에 많은 경우에 있어서 시물레이션은 통신 시스템에 적용될 수 있는 유일한 방법이다. 분석적 방법에 의한 모델은 많은 가정과 추상화를 필요로 하여 모델을 왜곡할 위험이 있으며 네트워크의 성능분석을 위한 분석적 모델의 설계에는 설계자의 상당한 노력과 기교를 필요로 한다. 시물레이션 기법을 사용하면 결과를 얻는데 분석적 기법에 비해 시간을 많이 소요하지만, 네트워크의 상세한 부분까지 모델링이 가능하고 대상 시스템에 대한 모델링이

비교적 용이하며 가정과 추상화가 적으므로 보다 정확한 결과를 얻을 수 있다[6][7].

객체 지향 기법으로 구현된 DEVS 모델링 및 시물레이션 환경은 모델의 재사용성, 독립적 테스트 기능, 모듈화 등의 장점들을 제공할 뿐 아니라[1], 성능분석용 실험 장치의 용이한 구현방법을 제공함으로써 사건 중심으로 표현되는 패킷망 구조의 성능분석에 있어서 최적의 기능을 발휘할 수 있다.

본 연구에서는 DEVS 모델링 및 시물레이션 환경을 패킷망의 성능분석에 적용하여 패킷망의 성능분석에 보다 나은 방법을 제시하고자 하였다.

2장은 패킷망의 개요이며, 3장에서는 DEVS 모델링에 중요한 개념인 시스템 객체 구조(System Entity Structure)와 모델 베이스(Model Base)에 대해 설명하였다. 4장에서는 패킷망의 모델링 방법에 대해 기술하였고, 5장에서는 패킷망을 분석하는 역할을 하는 실험 장치(Experimental Frame)에 대해 설명하였다. 6장에서는 하나의 특정 네트워크 예를 선택하여 모델링한 기법과 시물레이션 결과에 대해 살펴보았다. 그리고 7장은 결론이다.

2. 패킷망의 개요

데이터의 교환 방식에는 회선교환(Circuit Switching), 메시지교환(Message Switching), 그리고 패킷교환(Packet Switching) 방식이 있다. 이 중에서 패킷교환 방식은 회선교환과 메시지교환 방식의 장점을 취한 방식이다[8].

패킷교환 방식은 메시지교환 방식과 비슷하나 데이터의 길이가 제한된다는 점에서 차이가 있다. 이렇게 제한된 데이터를 패킷(packets)이라고 한다. 이 패킷은 전송할 데이터와 전송될 목적지에 관한 정보를 지니고 있다. 이 패킷교환 방식은 각각의 패킷이 독립적으로 전송되는 데이터그램 방식(datagram)과 가상회선(virtual circuit)을 이용한 방식이 있다.

데이터그램 방식은 경로가 미리 결정되는 것이 아니라 각 노드에서 경로를 결정하므로 혼잡한 경로를 택하지 않을 수 있어 보다 높은 유연성을 지니며, 경로를 선택하기 위한 사전 호출 절차가 불필요하다. 그리고 가상회선 방식이 하나의 노드가 고장나면 그 곳을 통과하는 모든 데이터를 잃는데 반해 이 방식은 다른 경로를 택할 수 있으므로 보다 높은 신뢰성이 있다. 그러나, 데이터그램 방식

에서는 메시지(message)가 패킷으로 분리되어 전송되기 때문에 순서가 뒤바뀔 수 있으므로 최종 목적지에서는 이 패킷들을 재조합(reordering)하여 메시지로 만드는 것이 필요하다.

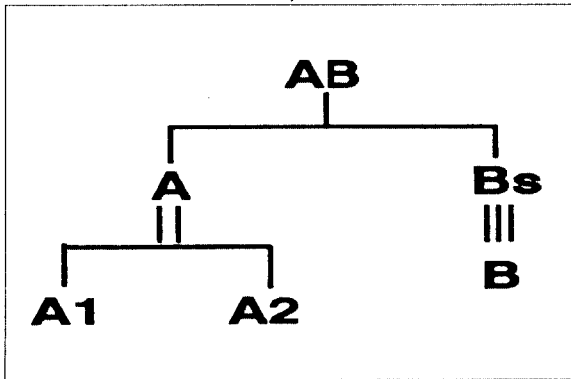
토폴로지(topology)의 관점에서 패킷교환 네트워크의 주요한 특징 가운데 하나는 패킷의 송신처(source)와 수신처(destination)사이에 다수의 경로가 존재한다는 것이다. 패킷이 송신처와 수신처 사이에 다수의 경로가 존재하기 때문에 패킷 교환 네트워크는 패킷이 적합한 경로를 선택하여 송신이 될 수 있도록 하여야 한다[3].

경로선택 전략에는 고정경로방식(fixed or deterministic routing), 임의경로방식(random routing), 범람경로방식(flooding), 적응경로(adaptive routing)방식이 있다[8][9].

3. SES/MB(System Entity Structure/ Model Base)

3.1. SES(System Entity Structure)

선언적 특징을 갖는 SES는 구성원들의 분할, 분류, 결합관계, 제약조건 등을 표현할 수 있는 구조체를 말한다 [13]. SES는 entity, aspect, 그리고 specification이라는 3가지 모드로 구성되어 있다. 간단한 SES의 예가 <그림 1>에 나타나 있다[10]. entity는 실제 세계의 사물을 나타내는



<그림 1> 간단한 SES의 예

모델에 해당하며 여러개의 aspect와 specification을 지닐 수 있다. aspect는 entity의 여러 구성부분들을 나타내며, 여러

개의 entity를 지닌다. 이것은 <그림 1>에서 한 줄의 수직선에 의해 표시된다. specialization은 entity에 대한 분류를 나타내며, 여러개의 entity를 지닌다. 이것은 <그림 1>에서 두 줄의 수직선에 의해 표시된다. entity-aspect 관계는 분할적 지식을 나타내며, entity-specification 관계는 분류적 지식을 나타낸다. multiple entity는 동종의 요소들의 집합을 나타내는 entity로, 시스템에서 갯수가 가변적인 여러개의 entity가 있을때 사용된다. 이러한 mutiple entity의 aspect가 multiple aspect이다. 이것은 <그림 1>에서 수직선 세 개에 의해 표시된다. <그림 1>에서 보면 모든 구성원들을 표현하는 대신, 오직 B만을 표현하는 것으로 대체되는 것을 알 수있다.

SES에 표현되는 여러 가능한 구조중 하나의 대상구조를 선택하기 위하여 우리는 pruning이라는 과정을 이용할 수 있다. 이 pruning을 통하여 SES는 PES(pruned entity structure)로 된다. Pruning은 SES내의 선택 지점에서 하나의 entity를 선택하는 것이고, 이 결과로 PES가 생성된다.

3.2. MB(Model Base)

MB는 절차적 특징을 갖는데, 각 모델은 동역학적이고 기호적으로 표현된 지식을 말한다. DEVS 환경에서 시스템은 시간베이스, 입력, 상태, 출력 그리고 함수들을 갖으며, 여기서 함수들은 현재 상태와 입력들에 근거하여 다음 상태와 출력들을 결정한다. DEVS 형식론에서 가장 기본이 되는 모델인 atomic 모델은 다음과 같은 구조로 표현된다[1][11].

$$M = \langle X, S, Y, \delta_{int}, \delta_{ext}, \lambda, t_a \rangle$$

X : 외부입력사건들의 집합

S : 상태변수들의 집합

Y : 외부출력사건들의 집합

δ_{int} : 내부전이함수

δ_{ext} : 외부전이함수

λ : 출력함수

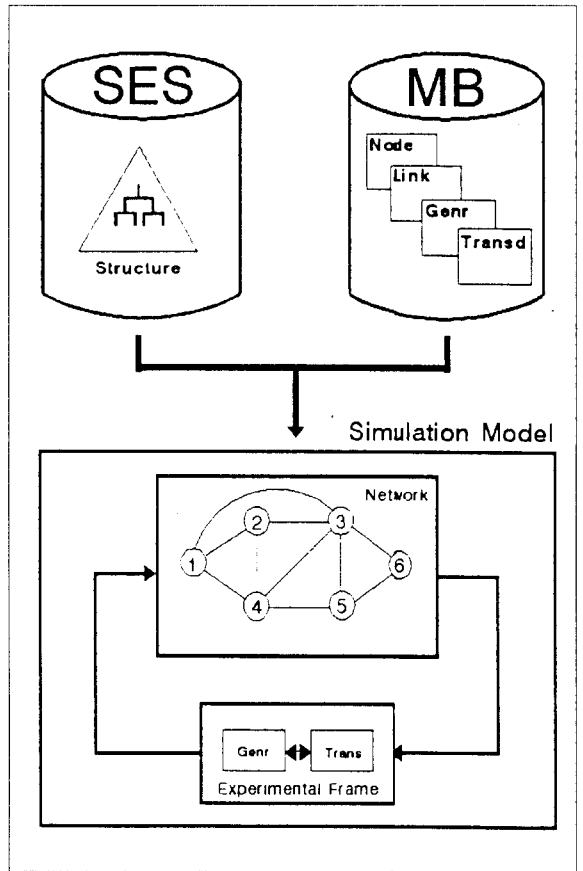
t_a : 시간진행함수

이러한 atomic 모델은 외부사건을 받아들이는 입력단자의 집합, 외부사건을 내보내는 출력단자의 집합, 상태변수

들과 파라미터들의 집합, 내부전이의 시기를 조절하는 시간진행함수, 시간진행함수에 의해 주어진 시간이 지난 후에 시스템이 어떤 상태로 전환할 것인지를 결정하는 내부전이함수, 외부입력이 들어왔을때 시스템이 어떻게 상태를 변환할 것인지를 결정하는 외부전이함수, 그리고 내부전이가 일어나기 바로 전에 외부출력을 내보내는 출력함수에 관한 정보를 지닌다.

3.3 SES/MB 개념

SES/MB 개념은 시물레이션의 동역학적 형식론(dynamics-based formalism)과 AI의 상징적 형식론(symbolic formalism)을 통합하려는 시도로 Zeigler(1986)에 의해 제안되었다[1]. DEVS 환경의 본질을 이루는 SES/MB 개념은 구조적 지식의 표현 방법인 시스템 객체 구조(SES)와 행동적 지식의 표현 방법인 모델 베이스(MB)라는 두개의 구성원을 갖는다. 이 두 지식 표현방법을 통합시킴으로서 전체 시물레이션 환경이 제공된다. <그림 2>에서 처럼 최종적 시물레이션 모델은 MB에 저장된 노드와 링크 모델이 SES로 저장된 네트워크 구조에 따라 자동생성 및 결합되어 완성되어 진다.

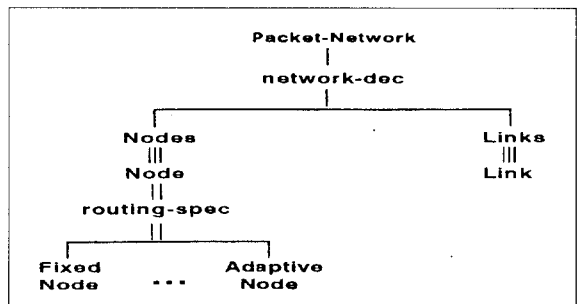


<그림 2> SES/MB와 개략적인 시물레이션 구성도

4. 패킷망 모델링

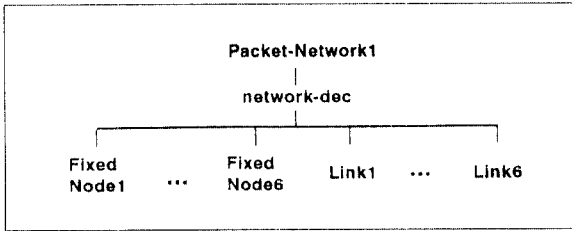
4.1. 패킷망의 SES

패킷망의 SES는 <그림 3>에 나타난 것과 같다. <그림 3>과 같이 패킷망은 노드와 링크로 구성되고, 노드와 링크는 네트워크에 따라서 여러개의 노드와 링크로 구성된다. <그림 3>에 나타난 고정노드, 적응노드와 그 외에 임의노드, 범람노드 등은 경로선택전략에 따른 노드이다. 고정노드와 임의노드는 네트워크내의 링크 고유비용에 따라 패킷의 경로를 결정하며 범람노드는 연결된 모든 링크로 패킷을 전달하고 적응노드는 네트워크내의 지연상황에 대한 정보를 수집하여 그것에 근거하여 다음 경로를 결정한다. <그림 4>는 pruning된 구조인 PES로 여기서는 고정경로방식 네트워크로 pruning된 예이다. 이 밖에도 적응경로방식, 임의경로방식, 범람경로방식 네트워크 등으로 pruning될 수 있다. 네트워크내의 고유 고정비용(fixed cost)에 따라 패킷의 다음 경로를 결정하는 고정경로방식과 임의



<그림 3> 패킷 네트워크의 SES

경로방식, 그리고 노드가 연결된 모든 링크로 패킷을 전달하는 범람경로방식은 링크와 노드가 패킷의 전달을 위해 연결된 모두 같은 입·출력 연결구조를 갖고, 그리고



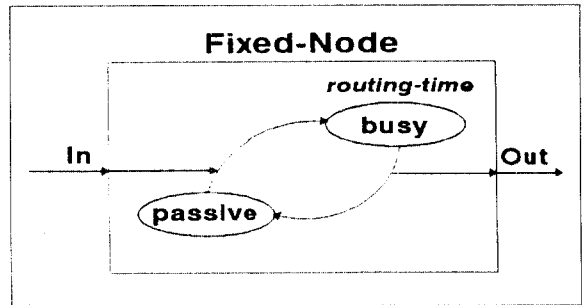
〈그림 4〉 〈그림 3〉의 PES의 한 예

네트워크 내의 지연상황에 대한 정보를 노드가 전달받아 패킷의 다음 경로를 결정하는 적응경로방식은 링크와 노드간의 패킷 전달을 위한 연결구조외에 링크와 노드모델 간에 지연 정보를 전달하는 입·출력 연결구조를 더 갖게 된다.

4.2. 노드와 링크의 모델링

노드 모델과 링크 모델은 DEVS 형식론에 입각하여 atomic 모델로 구현된다. 아래의 〈그림 5, 6〉은 노드 모델 중 가장 간단한 고정노드 모델에 관한 그림이다. 〈그림 5〉는 고정노드의 입력과 출력, 그리고 노드 내부에서의 상태변화를 나타낸 그림이다. 외부에서 입력단자로 패킷이 들어오면 외부전이함수에 의해 passive 상태가 busy 상태로 전환되고, routing-time 만큼 지연된 뒤 출력함수에 의해 출력단자로 패킷을 내보내며, 내부전이함수에 의해 busy 상태를 passive 상태로 전환한다. 〈그림 6〉에 이러한 고정노드 모델에 대한 의사코드가 있다. 이때 고정경로선택함수를 사용하여 다음에 패킷이 전달될 경로를 결정하는데 이 함수는 네트워크내의 각 링크의 고유 고정비용에 따라 그 비용값들의 합이 최소가 되는 경로를 결정한다. 고유 고정비용값은 미리 결정되어 있으며 시뮬레이션 중에 네트워크내의 패킷 지연정도에 따라 변하지 않는 불변의 값이다. 따라서 고정노드 모델들을 사용한 고정경로방식 네트워크에서 한 노드에서 다른 한 노드로의 경로는 언제나 일정하다. 임의노드 모델은 패킷이 들어온 경로를 제외한 다른 경로들 중에서 전달될 경로를 임의로 선택하되 노드에 주변에 연결되어있는 링크들의 고유비용값에 반비례하는 확률에 따라 다음 경로를 결정한다. 즉 고유비용의 값이 적은 링크에 전달될 확률을 높게 한다. 범람노드는 패킷이 전달되 들어온 경로를 제외하고 그 노드와

연결된 모든 경로로 패킷을 보낸다. 그러므로 범람노드는 고정비용값에 영향을 받지않으며 여러개의 출력단자를 지닌다. 적응노드는 앞의 노드들이 한개의 입력단자를 지닌 것과는 달리 두개의 입력단자를 지니는데 하나는 패킷을 받기 위한 단자이고 다른 하나는 네트워크내의 지연상황에 관한 정보를 받기 위한 단자이다. 이 지연상황에 관한 정보를 받기 위한 단자를 통해 각 링크들의 패킷 지연상황에 대한 정보를 수집하여 저장한 후 패킷이 입력단자를 통해 들어오면 그 정보를 이용하여 현재노드와 목적노드 사이의 가능한 여러경로들의 지연정도를 계산하여 지연이 가장 적을 것으로 예상되는 경로로 패킷을 내보낸다. 링크 모델은 외부전이함수 내에 큐를 설계하여 입력단자로 들어온 패킷을 고유비용과 패킷처리시간에 따라 지연후 출력단자로 내보내며, 적응경로방식의 네트워크에서는 하나의 출력단자를 더 설계하여 외부에서 패킷이 들어올때 링크내의 패킷의 지연상황을 각 노드들에게 전달한다.



〈그림 5〉 고정경로 노드 모델

5. 패킷망 분석을 위한 실험 장치의 개념

5.1. 실험 장치의 개념

성능평가를 위한 실험 장치(EF : Experimental Frame) [1][11] 역시 SES/MB 개념에 의해 구현되며 최종적으로 실험 대상 네트워크에 결합됨에 의해 시뮬레이션이 진행되어 진다. SES/MB 개념만의 특징이라 할 수 있는 실험 장치는 독립된 하나의 모듈로 존재하며, 대상 네트워크의 어느 부분과도 쉽게 결합함에 의해 테스트의 용이성을 제공할 수 있다. 〈그림 7〉은 EF의 SES이다.

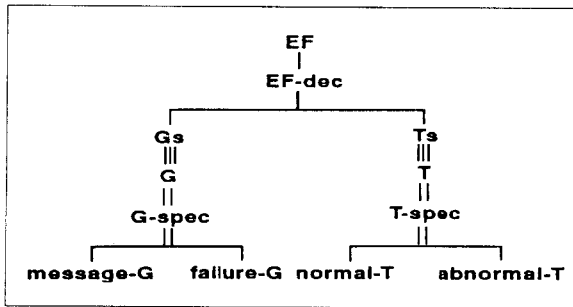
〈그림 8〉은 네트워크 구조가 EF와 결합된 전체 시뮬레

```

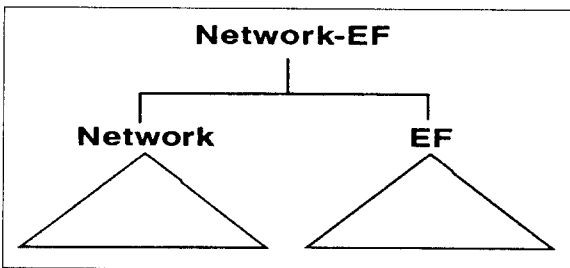
ATOMIC MODEL: FIXED NODE

state variables:  sigma = inf
                  phase = passive
                  message = ()
                  goal = ()
parameter:      routing-time = 0.0001
external transition function:
case input-port
  in: case phase
      passive: store packet
              store goal
              hold-in busy routing-time
      busy:    continue
  else: error
internal transition function:
case phase
  busy: passive
  passive: (does not arise)
output function:
  send packet to selected-out-port(by routing fuction)
    
```

〈그림 6〉 고정 노드의 의사코드



〈그림 7〉 EF의 SES



〈그림 8〉 네트워크와 EF의 결합된 구조

은 앞에서 설명한 네트워크 구조와 EF 구조를 간략화하여 표현한 것이다. 왼쪽의 삼각형은 네트워크의 SES를 오른쪽의 삼각형은 EF의 SES를 나타낸다.

5.2 발생기와 분석기 모델링

발생기는 일정한 주기로 패킷을 발생시키는 모델이다. 이것은 주로 내부전이와 출력에 의해 동작한다. 즉 패킷 발생을 중지시키는 외부입력 이외에는 외부전이함수가 필요없는 차지 모델이다. 이것은 내부전이함수에서 일정한 시간만큼 지연시키고 출력함수에서 출력을 내보내는 작업을 반복함에 의해 동작한다. 발생기에서 발생하는 패킷은 이름과 목적노드, 그리고 지연시간을 지닌다.

분석기는 처리율과 평균 지연시간이라는 성능분석의 기준이 되는 값들을 얻어내기 위하여 설계된다. 분석기 모델은 모델 자체에 시계를 지녀서, 관찰시간 동안 발생기에서 발생시킨 패킷의 이름을 ariv 단자로 받아들여서 도착시간과 함께 arrived-list에 저장한다. 만약 관찰시간내에 그 패킷의 이름이 solved 단자로 들어오면 solved-list에 저장하며 그때 시간과 도착시간의 차로 지연시간을 구한다. 이러한 작업은 관찰시간 동안 모두 외부전이함수에서 일어나며, 내부전이함수는 관찰시간이 지난 후 출력과 발생기에 중지 명령을 내보내는 데에만 이용된다. 출력함수에서는 관찰시간동안 구한 결과를 가지고 처리율과 평균지연시간을 계산하여 출력시키고, 발생기에 패킷 발생을 중지시키라는 명령을 내보낸다. 여기서 처리율과 평균지연시간은 다음과 같다.

$$\text{처리율} = \text{도착한 패킷수} / \text{관찰시간}$$

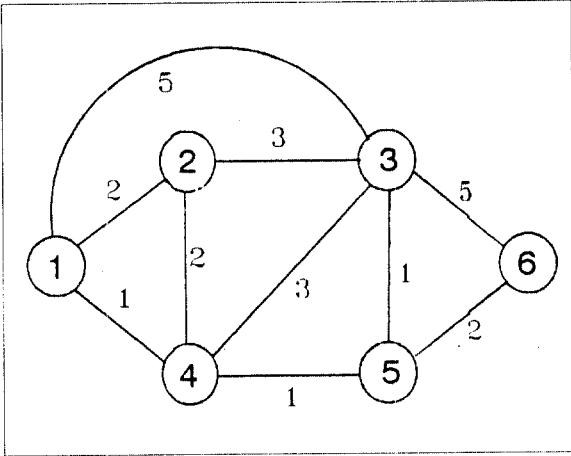
$$\text{평균지연시간} = \text{도착한 각 패킷의 지연시간의 합} / \text{도착한 패킷수}$$

발생기는 목적에 따라 패킷 발생기와 고장 발생기로 나눌수 있고 고장 발생기는 링크 또는 노드와 연결되어 고장을 발생시킬 수 있다. 또한 분석기도 정상 분석기와 비정상 분석기로 분류하여 비정상 분석기는 네트워크가 비정상 상태일 때의 성능을 분석할 수도 있을 것이다. 위에 설명한 발생기와 분석기는 패킷 발생기와 정상 분석기이다.

이전 구조에 대한 그림이다. 여기서 삼각형으로 표시된 것

6. 시뮬레이션

6.1 사례 개요



〈그림 9〉 패킷망의 예

패킷망의 경우, 해당 네트워크 구조는 쉽게 SES로 표현되며 각 노드(node)와 링크(link) 등의 모델들은 MB 개념에 의해 쉽게 표현될 수 있으며 아울러 독립적으로 테스트될 수 있다. 본 연구에서 사용된 패킷망은 〈그림 9〉에 나타나 있는데, 실험을 위해서 간단한 예를 선택하였다[8]. 본 연구에서는 〈그림 9〉의 네트워크를 DEVS 모델링하여 시뮬레이션하였다.

6.2. DEVS 모델링 구조

〈그림 10〉에는 모델화된 패킷망과 실험장치로 구성된 전체 시뮬레이션 시스템이 나타나 있다. SES를 살펴보면 전체 시스템은 크게 네트워크 모델과 실험장치 모델로 구성되고, 다시 네트워크 모델은 노드 모델과 링크 모델들로 구성되며, 실험장치 모델은 발생기 모델과 분석기 모델로 구성된다. 가장 하부구조에 놓인 노드 모델, 링크 모델, 발생기 모델, 그리고 분석기 모델은 MB를 구성하게 된다.

6.3. 적용된 경로선택전략

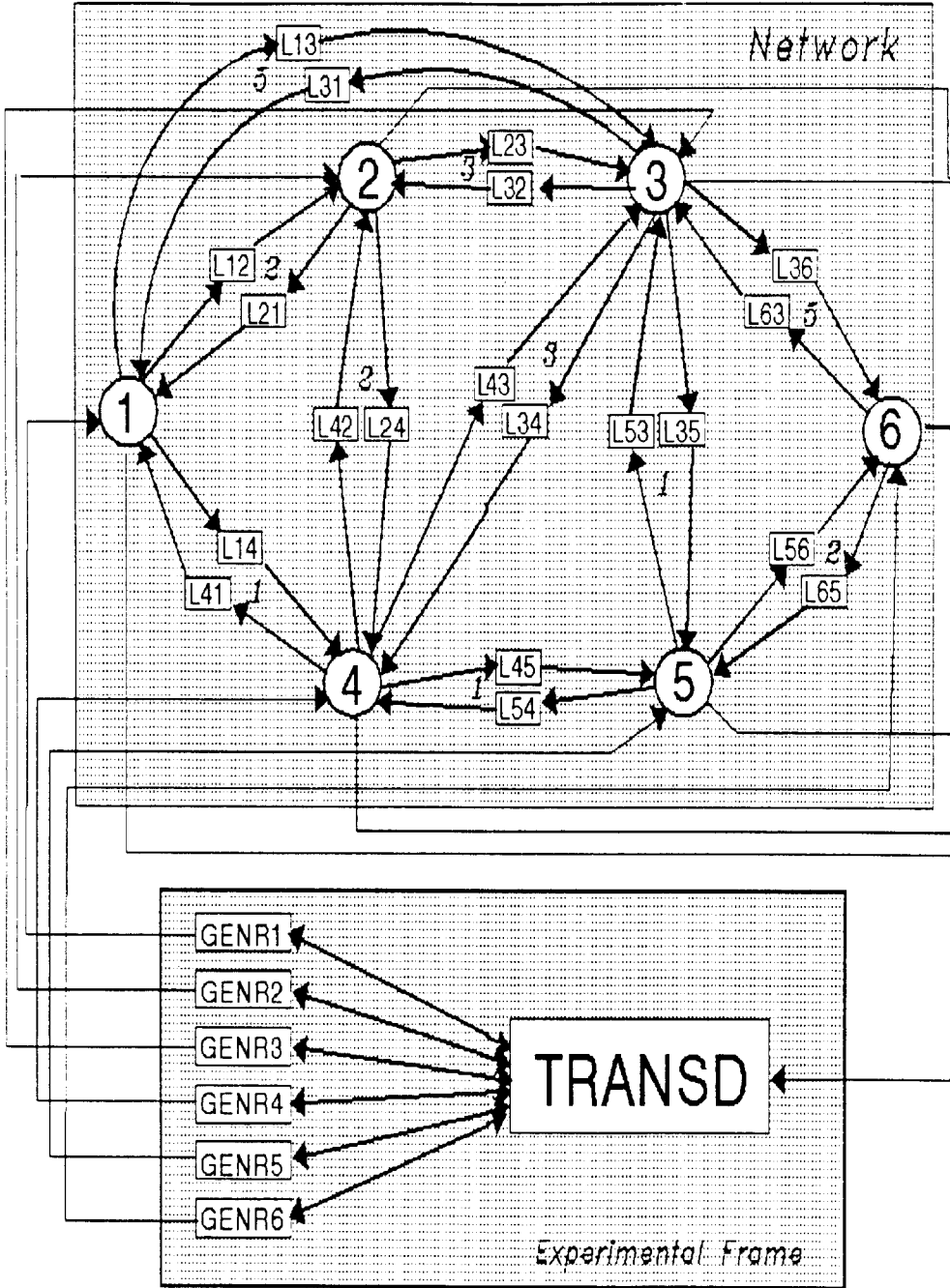
본 연구에서는 고정경로방식, 범람경로방식, 임의경로방식, 적응경로방식, 이 네가지 경로선택전략에 따라 시뮬레이션하였다.

고정경로방식은 가장 간단한 방법으로 어떤 기준(예를 들면 거리, 비용 등)에 의해 경로가 미리 결정되는 방식이다. 주어진 시작점으로부터 주어진 목적지로 가는 패킷은 기준에 의해 미리 결정된 경로를 따라가게 되므로 시작점과 목적지가 같으면 늘 같은 경로로 패킷이 전달된다. 그러므로 이 방식은 네트워크내의 특정 부분에 대한 혼잡이나 고장과 같은 상황에 대처하지 못한다. 이 방식의 장점은 간단함이고, 단점은 유연성의 부족이다.

범람 경로방식은 데이터가 전달되어온 링크를 제외하고 연결된 다른 모든 링크로 데이터를 전송하는 방식이다. 이 방식에서는 끊임없이 패킷이 전송되는 것을 방지하기 위하여 어느 시점에 패킷의 전송을 중지시켜야 하는데, 이 방법의 하나는 각 노드에서 지나간 패킷을 기억하였다가 다시 같은 패킷이 들어오면 무시하는 것이고 다른 하나는 홉(hop) 수를 적절히 제한하는 것이다. 이 방식은 네트워크에 관한 어떤 정보가 없어도 구현이 가능하고 견실하다는 장점을 가지고 있는데, 적용의 한 예로서 손실이 있을 수 있는 군사용 통신망을 들 수 있다. 단점은 링크의 연결 정도에 따른 전체 트래픽 부하(traffic load)의 증가 때문에 지연이 증가하게 된다는 것이다.

임의의 경로방식은 범람 경로방식과는 달리 한 링크로만 패킷이 전달된다. 이때 전달 링크의 선택은 데이터율이나 고정된 링크 비용에 따라 먼저 각 링크에 선택될 확률이 선정되고 그 다음에 그에 따라 임의로 링크를 선택하게 된다. 이때 패킷이 전달되어온 링크는 선택에서 제외된다. 패킷 전달에 있어서 지연 시간이 불확실하고 범람 경로방식보다는 적으나 트래픽 부하의 증가 때문에 잘 사용되지 않는다.

적용 경로방식은 네트워크의 환경 변화에 대응하지 못하는 다른 경로선택전략과는 달리 네트워크내의 상황 변화에 적응하는 방식이다. 경로선택 정보의 처리에 따라 고립 적응경로방식, 분산 적응경로방식, 중앙 적응경로방식으로 나눌 수 있다[8]. 이 방식은 복잡하고 많은 정보를 주고 받으므로 부하가 증가한다는 단점이 있지만 상황에 따라 대처할 수 있고 성능의 향상을 가져올 수 있다는 장



〈그림 10〉 모델화된 망구조와 실험장치

점 때문에 널리 사용되고 있다.

6.4 실험 방법

패킷교환 방식으로는 데이터그램 방식을 사용하였고 패킷의 발생빈도는 포아슨 분포로, 패킷의 처리시간은 지수 분포로 시뮬레이션하였다. 각 패킷은 이름, 목적 노드, 처리시간 등의 정보를 갖도록 하였다. 노드는 각 방식에 따라 경로를 선택하고, 링크를 통해 들어온 패킷을 경로 선택 결과에 따라 선택된 링크로 보낸다. 노드는 경로 선택 시 처리시간을 갖는데 이번 실험에서는 무시할 수 있을 정도로 작은 값을 설정하였다. 그리고 메시지의 분해와 재조합 시간은 고려하지 않았다. 링크는 노드로부터 들어온 패킷을 다른 편에 있는 노드에 전달하며 이 실험에서 링크는 패킷 처리가 지연될 때 패킷들이 저장될 무한대의 큐를 지니게 설계하였다. 링크의 큐는 먼저 들어온 패킷이 먼저 처리되도록 하였다. 그리고 링크는 각각 고유 고정비용을 갖는데, 이 비용들은 <그림 9, 10>에 나타나 있다. 큐에서의 지연시간은 각 패킷의 고유 고정비용과 패킷 처리시간에 의하여 결정되도록 하였다.

고정 경로방식에서 경로는 링크들의 고유 고정비용에 의해 결정하였다. 즉 이 방식에서는 출발지로부터 목적지까지 놓이게되는 링크들의 고정비용의 합이 최소가 되는 경로를 따라 패킷이 전달되도록 설계하였다. 이때 각 링크의 고정비용값은 가변적인 값이 아니다. 패킷이 들어온 경로를 제외하고 모든 경로로 패킷이 전달되는 범람 경로 방식에서 패킷의 계속적인 전달은 패킷의 홉(hop) 수를 한정시킴으로써 방지하였다. 이 실험에서는 홉 수를 3으로 한정하였다. 임의 경로방식에서 패킷의 전달시 확률은 각 노드에 연결된 주변 링크들의 고유 고정비용에 따라 결정하였다. 고정비용이 작은 링크로의 전달 가능성이 큰데 이것은 랜덤함수를 사용하여 구현하였다. 적응 경로방식에서는 각 노드가 별도의 경로를 통하여 들어온 각 링크의 혼잡 정도에 관한 자료를 저장하도록 하였다. 또 각 노드는 경로 결정 시 이 저장된 자료를 가지고 패킷을 목적지에 전송할 수 있는 여러 경로의 지연상황을 분석하여 연 시간이 가장 작을 것으로 예상되는 경로를 판단한 후 그 경로에 해당하는 링크로 패킷을 전송하도록 하였다. 즉 적응 경로방식 중 분산형 적응방식을 채택하였다. 지연상황의 분석은 각 링크로부터 받은 패킷의 예상지연

시간을 가지고 여러 경로에 대해 그 값들을 합하여 각 경로의 소요시간을 계산하는 것이다. 그리고 네트워크에서 노드나 링크의 고장이나 손실은 없는 것으로 가정하였다.

6.5 실험 결과 및 분석

본 연구에서는 출력된 처리율과 평균 처리 시간을 가지고 성능을 분석하였다. 즉 패킷당 처리에 걸린 시간을 말한다. 실험은 패킷의 발생 주기와 링크의 고유 비용에 따라(조건 A, 조건 B, 조건 C) 실험을 하였다. 실험의 조건은 <표 1>과 같다. 조건들을 비교하면, 조건 A의 패킷 발

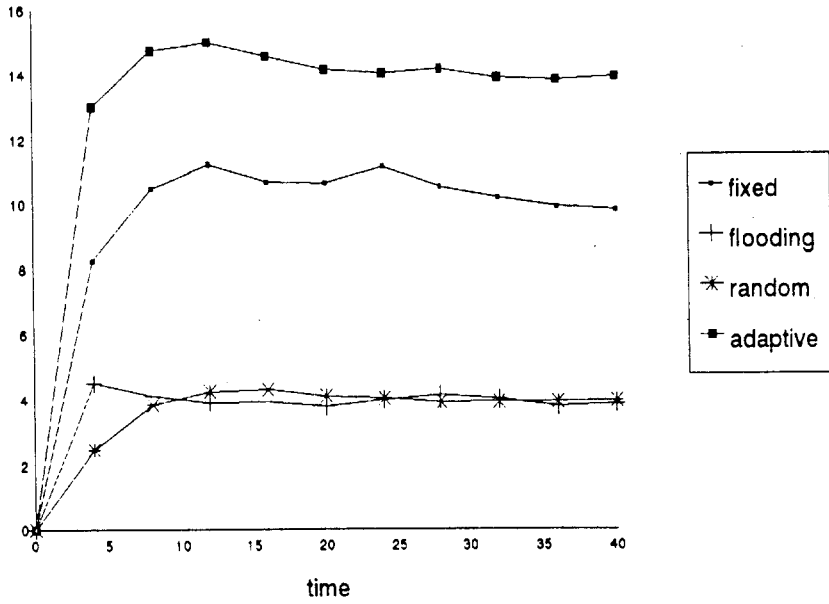
<표 1> 실험의 조건

	패킷 발생 주기	링크 고유 비용
조건 A	α	β
조건 B	α	$\beta * 10$
조건 C	$\alpha * 10$	$\beta * 10$

생 주기와 링크의 고유 비용이 각각 α 와 β 라고 할때, 조건 B의 주기와 비용은 각각 α 와 $\beta*10$ 이고, 조건 C의 주기와 비용은 각각 $\alpha*10$, $\beta*10$ 이다. 즉 조건 B는 조건 A에 비해 링크 고유 비용이 10배 크고, 조건 C는 조건 A에 비해 패킷 발생 주기와 링크 고유 비용이 각각 10배이며 조건 B에 비해서는 패킷 발생 주기만 10배이다. 이 결과는 <그림 11>, <그림 12>, <그림 13>에 나타나 있다.

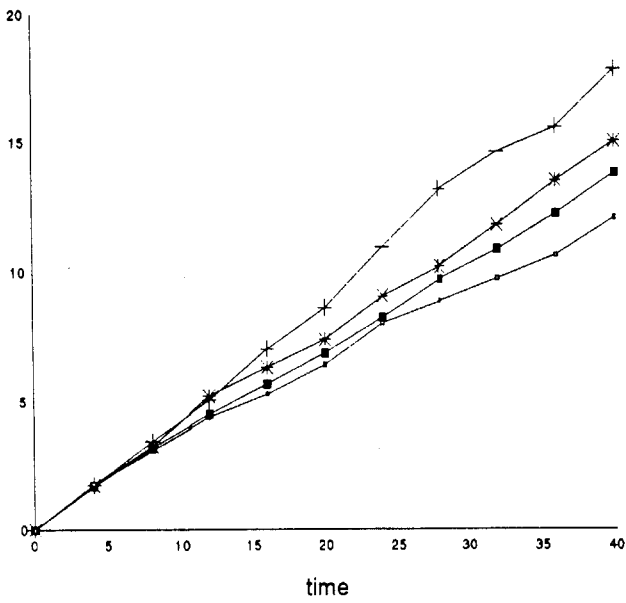
그림에서 보듯이 처리율은 어느 조건에서나 적응 경로 방식이 아주 우수함을 알 수 있다. 조건 A는 조건 B에 비해 링크 고유비용에 의해 덜 영향을 받으므로 적응 경로 방식이 고정 경로 방식에 비해 더 우수하게 나타나고 있다. 범람 경로 방식의 평균 처리 시간이 가장 길며 처리율 또한 낮은 것을 통해 이 방식이 네트워크에 가장 많은 트래픽 부하가 걸려서 지연 시간이 늘어나고 그에 따라 처리율 또한 초기에 얼마간은 임의 방식 보다 높으나 시간이 지남에 따라 조건 A, B와 같이 별로 차이가 없거나 조건 C와 같이 더 나빠짐을 알 수 있다. 조건 A, B에서 도착된 패킷들의 평균 처리 시간이 고정 경로 방식이 약간 우수하게 나오나 전체적인 성능은 적응 경로 방식이 가장 우수하며, 조건 C에서는 처리율과 평균 처리 시간

throughput



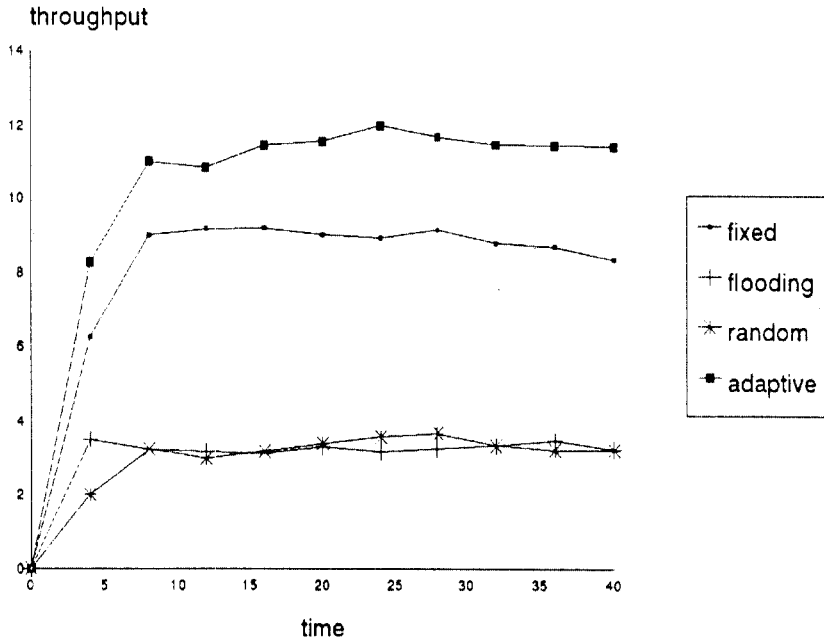
(a)

average turn-around time

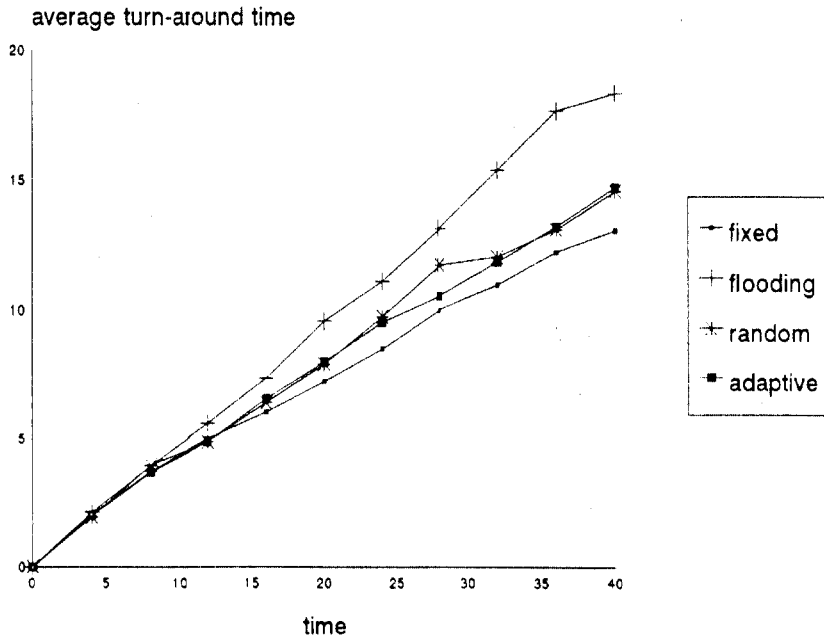


(b)

〈그림 11〉 조건 A



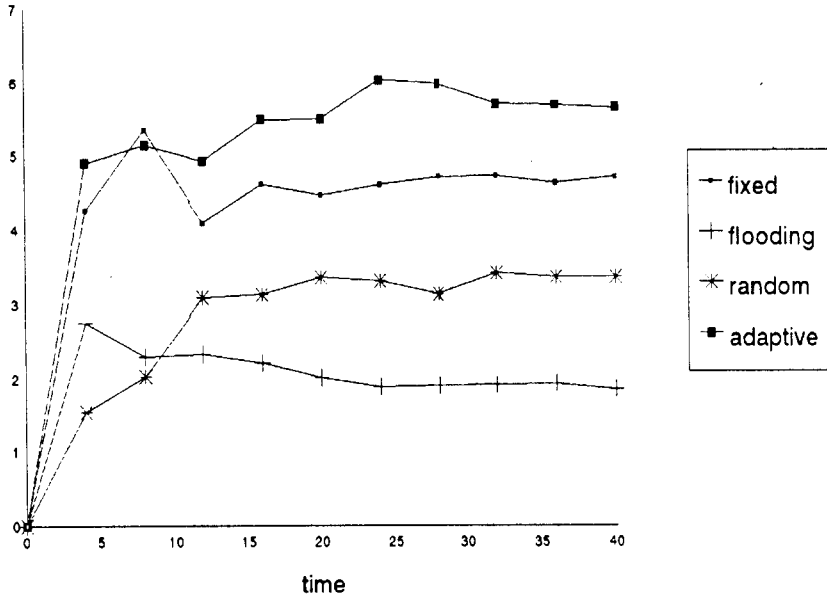
(a)



(b)

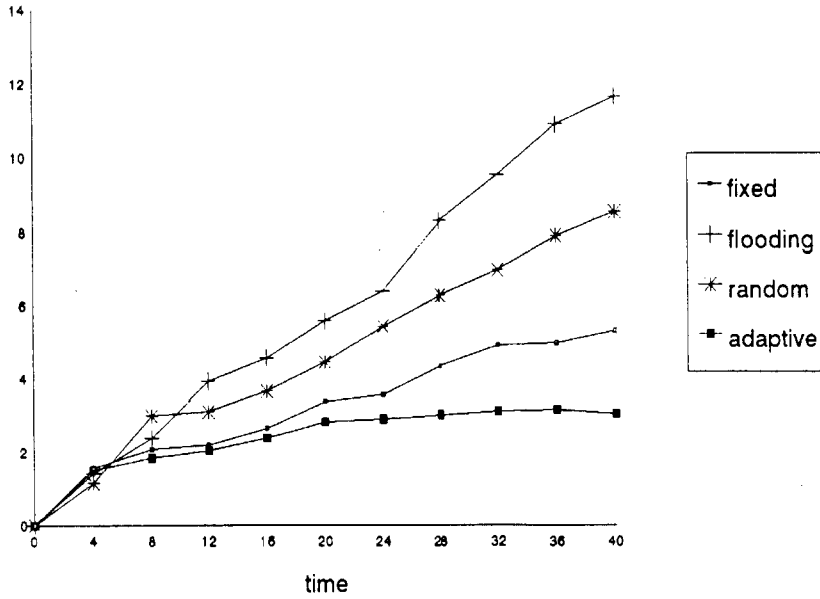
〈그림 12〉 조건 B

throughput



(a)

average turn-around time



(b)

<그림 13> 조건 C

모두 적응 경로 방식이 우수하게 결과가 나왔다. 조건 A, B에서 고정 경로 방식의 평균 처리 시간이 조금 우수한 것은 이 방식은 무조건 링크 고유 비용이 가장 작은 경로로 패킷이 운반되는데, 상대적으로 입력 패킷의 수가 많아서 네트워크 내에 부하가 많이 걸려 상태에서 도착한 패킷만의 지연시간은 고정 경로 방식이 우수할 수도 있다. 그러나 적응 경로 방식은 각 경로의 패킷 지연 상황에 따라 적절히 패킷을 운반하기 때문에 지연 시간이 약간 길어질 수도 있으나 처리율이 우수하다.

경로 선택 전략을 살펴볼때 네트워크 각 부분의 트래픽 부하 상태를 피드백(feedback)받아 그를 바탕으로 경로를 선택하는 적응 경로 방식의 성능이 비교적 가장 우수하게 나타났는데, 패킷의 발생 빈도를 증가시켜 네트워크 내의 부하가 클수록, 링크의 고정 비용이 작아질수록 다른 방식들에 비해 더 좋은 성능을 나타내었다.

7. 결론

본 연구에서는 DEVS 모델링 기법을 패킷망의 성능 분석에 적용하였다. 패킷망을 경로 선택 전략에 따라 여러 조건으로 실험하여 각각의 성능을 분석하였다. 실험을 통하여 각각의 경로 선택 전략에 따른 장단점을 파악할 수 있었고, 이러한 실험에 DEVS 모델링의 적합성을 살펴보았다. 네트워크는 노드와 링크라는 두 종류의 모델들의 구조적 결합으로 형성되는 것이므로 SES/MB 개념은 패킷망 시뮬레이션 모델의 설계와 구현이 용이하였다. 패킷망의 운용은 그 자체가 주로 시간과 사건으로 분석될 수 있기 때문에 DEVS 모델링 기법의 적용이 아주 용이하였으며, 모듈화된 모델들을 통한 네트워크의 모델링은 실제 시스템의 동작 방식에 가깝게 접근할 수 있었다. 그리고 실험 장치와 네트워크 모델간의 상호관계에 의한 실험은 보다 나은 실험 환경을 제공하였다. 즉 EF의 개념은 네트워크의 독립적 성능분석을 가능케하였고 테스트의 유연성을 제공하였다.

본 연구에서는 큐의 크기를 무한대로 하고 네트워크 내에 장애 발생에 대한 고려가 없는 등 비교적 간단한 네트워크를 대상으로 시뮬레이션하였으나, 앞으로 실제 네트워크에 가까운 보다 복잡한 네트워크와 네트워크 내의 고장 발생시 이에 대한 진단 및 복구, 혼잡 제어 등이 고려된 지능형 네트워크의 모델링이 연구과제로 남아 있다.

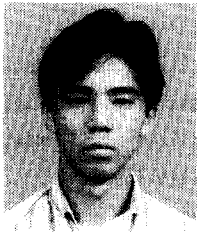
참고문헌

- [1] Zeigler, B. P., *Object-Oriented Simulation with Hierarchical, Modular Models*, Academic Press, 1990
- [2] V.Ahuja, *Design and Analysis of Computer Communication Networks*, McGRAW-HILL, 1982
- [3] 이인행과 김영훈, 「데이터 통신과 패킷 교환」, 홍릉과학출판사, 1992
- [4] B.W. Stuck and E. Arthurs, *A Computer and Communications Network Performance Analysis Primer*, Prentice-Hall, 1985
- [5] A. Giessler and J.O. Hänle, "Simulation of packet switched data communication networks," North-Holland Publishing Company, *Computer Network and Simulation II*, pp 119-139
- [6] Hussein T. Mouftah, "Distributed Discrete Event Simulation for Communication Networks," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 8, no. 9, pp. 1723-1734, Dec. 1990.
- [7] James F. Kurose, "Computer-Aided Modeling, Analysis, and Design of Communication Networks," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 6, no. 1, pp. 130-145, Jan. 1988.
- [8] William Stallings, *Data and Computer Communications*, Macmillan, 1985
- [9] D.W. Davies, D.J.A. Barber, W.J. Prince and C.M. Solomonides, *Computer Networks and Their Protocols*, John Wiley & Sons, 1979
- [10] Chi, S.D., "Modelling and Simulation for High Autonomy Systems," Ph.D Dissertation, Univ. of Arizona, 1991
- [11] Zeigler, B. P., *Multifaceted Modelling and Discrete Event Simulation*, Academic Press, 1984
- [12] Kim, T. G. and Zeigler, B. P., "The DEVS-Scheme Modeling and Simulation Environment," in chap. 2 : *Knowledge-based Simulation*, Eds. : P.A. Fishwick and R. Modjeski, Springer-Verlag, pp. 20-35, 1991
- [13] Kim, T. G., "EPS-scheme: A Realization of System Entity Structure in a LISP Environment," *Proc. in AI and Simulation*, '89 Eastern Multi-simulation Conf., vol. 29, No. 4, pp. 135-140, Tempa, Florida, 1989

● 저자소개 ●

**박상희**

- 1962년 연세대학교 공과대학 전기공학과 졸업(공학사)
 1964년 연세대학교 공과대학 전기공학과 석사과정 졸업(공학석사)
 1971년 연세대학교 공과대학 전기공학과 박사과정 졸업(공학박사) 및
 연세대학교 공과대학 전기공학과 조교수
 1982년 미국 워싱턴대 교환교수
 현재 연세대학교 공과대학 전기공학과 교수

**이왕재**

- 1993년 연세대학교 공과대학 전기공학과 졸업(공학사)
 1993년~ 연세대학교 공과대학 전기공학과 석사과정

**이석필**

- 1990년 연세대학교 공과대학 전기공학과 졸업(공학사)
 1992년 연세대학교 공과대학 전기공학과 석사과정 졸업(공학석사)
 1992년~ 연세대학교 공과대학 전기공학과 박사과정

**지승도**

- 1982년 연세대학교 공과대학 전기공학과(공학사)
 1984년 연세대학교 공과대학 전기공학과 석사과정 졸업(공학석사)
 1991년 미국 아리조나대학교 전기전산공학과 박사과정 졸업(박사)
 1992년~ 한국 항공대학교 전자계산학과 전임강사