

論文97-34C-5-2

# 퍼지 제어를 위한 시간형 퍼지 페트리넷 모델

## (Timed Fuzzy Petri Net Model for Fuzzy Control Model)

尹 正 模 \*

(Jung-mo Yoon)

## 요 약

페트리넷은 복잡한 동시 발생 및 병행적 시스템의 모델링에 적용할 수 있는 그래프 모델로서 산업 공학, 전산학, 전기공학, 화학 등에서 많이 사용되어지고 있다. 최근에는 페트리넷의 응용이 통신 프로토콜에까지 적용되었는데 복잡한 시스템을 표현하기 위하여 확장된 페트리넷 형태인 시간형 페트리넷, 확률적 페트리넷, 퍼지 페트리넷과 시간형 퍼지 페트리넷들이 있다. 따라서, 본 논문에서는 시간형 페트리넷에서 사용되는 진보된 통신 프로토콜 모델링 방법을 제안한다. 시간형 퍼지 페트리넷의 사용에 있어서, 함수의 배열로서 트랜지션과 점화 지연 시간의 퍼지값으로 소속함수를 소개합니다. 제안된 방법은 명확한 점화 규칙을 만들 수 있고, 크게 영향을 미치는 통신 프로토콜 분석과 설계하는데에 사용되어질 것으로 사료됩니다.

## Abstract

The Petri net is a graphic model which is adaptable in modeling a complex concurrent parallel system, and it is widely used in the fields of industrial engineering, computer science, electric engineering and chemistry. Recently, the net is applied to the communication protocol, and extended to represent complex systems. There are several extended Petri nets named as TPN(Timed Petri net), SPN(Stochastic Petri net), FPN(Fuzzy Petri net) and TFPN(Timed Fuzzy Petri net). Accordingly, this paper proposes an advanced communication protocol modeling method using the TFPN. For the use of TFPN, this paper also introduces the membership function by using the fuzzy value of the transition and firing delay time as the arguments of the function. The proposed method can produce clearer firing rules, and it is supposed to be used to design and analyse communication protocols in great effect.

## I. 서 론

페트리넷(Petri Net)은 비동기적이고 동시 발생 시스템에 있어서, 정보 흐름을 모델링 하는 그래픽 도구로서 현재 많은 응용 분야에서 널리 사용되고 있다.<sup>[1]</sup>

그렇지만, 기본적인 페트리넷은 복잡한 시스템 분야

에서 분석하기란 많은 문제점이 있기 때문에 좀 더 효율적인 모델링 방법을 얻기 위하여 기본 페트리넷 정의에 확장 혹은 변경된 페트리넷들(Extended Petri Nets)을 사용하였다. 예를 들면, Timed Petri Net (TPN), Stochastic Petri Net(SPN), Fuzzy Petri Net(FPN) 등이 등장하여 복잡한 시스템의 모형화를 표현 가능하도록 해주었다.<sup>[6-9]</sup>

본 논문에서는 분산된 프로세서끼리의 상호 작용하는 방법을 결정하는 규칙들 집합인 프로토콜을 시스템 동작을 모델링하는 대상의 하나로서 확장된 페트리넷인 시간형 페트리넷과 퍼지 제어를 합성한 시간형 퍼지 페트리넷을 제안한다.

\* 正會員, 서울産業大學校 電子計算學科

(Dept. of Computer Science Seoul National Poly-technic Univ.)

※ 이 논문은 1995년도 서울산업대학교 공모과제 학술연구비에 의하여 연구되었음.

接受日字:1997年1月14日, 수정완료일:1997年4月30日

본 논문의 구성은 2장에서는 연구방법을 설명하고, 3장에서는 시간형 페트리넷을 소개하고, 시간형 퍼지 페트리넷(TFPN)을 정의 및 검증한다. 4장에서는 제시한 시간형 퍼지 페트리넷(TFPN)을 사용하여 기존의 통신 프로토콜을 모형화하였으며, 끝으로 5장에서는 본 논문의 결론을 서술하고 앞으로의 연구 과제를 제시한다.

## II. 연구 방법

먼저, 기존의 페트리넷에 대한 정의, 접화 규칙과 적용범위, 사례연구와 이에 대한 확장된 시간형 페트리넷을 연구하였으며, 퍼지 페트리넷에 관련된 퍼지이론의 일부 및 퍼지 규칙을 연구하여, 상호 관련된 장점을 효율적으로 이용한 시간형 퍼지 페트리넷을 제안하고, 기존의 통신 프로토콜에 적용해 보았다.

### 1. 연구의 필요성

기존의 페트리넷(Petri net) 모델은 비동기적(asynchronous), 비결정적(nondeterministic)인 실시간 시스템을 모델링하기에 적합한 도구로써 시스템 제어(control)의 설계, 사양(specification) 작성과 분석에서 발생하는 비가시성과 복잡성을 해결하기 위해 연구가 진행되고 있다.

특히, 통신 프로토콜이나 제어 대상 시스템에 퍼지 논리 제어를 통해 상태의 변화를 측정하기 위한 프로세서나, 제어에 필요한 규칙을 미리 규정함으로써 수행 성능 평가라든가, 퍼지 제어에 이용되어 확장된 형태의 퍼지 페트리넷(Fuzzy Petri Net : FPN)들이 활발히 진행되고 있다. 하지만, 제어 규칙을 분석하기 위한 모델이 부족하며, 동시에 분석 방법에 있어서 가시성(readability)이 결여되어 있다는 단점을 지니고 있으며, 또한 시간적 개념을 다루고 있지 않다.

### 2. 연구 목적

본 논문은 기존에 제시된 통신 프로토콜에 널의 도달가능성과 성능 분석 평가를 위한 확장된 형태의 시간형 퍼지 페트리넷을 제시하여 모델링 과정을 나타내고자 한다.

기존의 연구 논문인 "Fuzzy Petri Net을 이용한 Communication Protocol의 data control과 modeling"<sup>[4]</sup>은 제안된 퍼지 페트리넷에서 예측 불가능한 입력값들을 퍼지 추론을 통해서 해결하려 했으며,

퍼지 논리 제어를 통해 기존의 제어하기 어려웠던 상태를 제안토록 하였다. 하지만, 일반적인 퍼지의 의미를 표현하기 보다는 신뢰성(reliability)을 의미하는 바가 크며, 특히 제어에서 필요한 지연 시간의 의미를 다루고 있지 않다.

페트리넷과 관련된 기본적인 자료는 참고 문헌<sup>[2]</sup>을 통해 이해했으며, 그 외의 몇가지 논문<sup>[3, 5]</sup>에 기초한 각각의 장점 및 단점을 서로 수정 보완하여 제시하였다.

## III. 페트리넷(Petri Net)과 시간형 페트리넷(Timed Petri Net)

페트리넷은 병행성이 있는 거의 모든 문제(예: protocol, scheduling, architecture, process control, AI 등)에 모형화 대상 시스템의 특성(예: 상호 배타 문제, 동기화 문제등)과 분석 요소(예: 신뢰성, 성능, 자원 보존성, 도달성, 고장, 인성등)에 따라 정규 페트리넷(ordinary Petri nets)을 확장 축소하여 사용한다.

시간형 페트리넷은 원래의 페트리넷에 시간과 관련된 요소를 부가하여 모델링한 것이다. 이렇게 시간 요소를 부가하는 방법은 모델링 영역을 확대하여 여러 장점을 갖게 되는데, 널의 3가지 종류에 따라 Condition Event Net(C/E Net), Place Transition Net(PT Net), 그리고 Predicate Transition Net(Pred TN)에 적용할 수 있다.

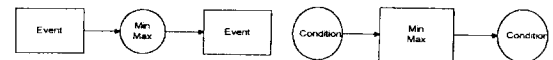


그림 1. 시간형 C/E Net  
Fig. 1. Timed C/E Net.

### 1. Timed Condition Event Net

이 절에서는 C/E Net에서 시간 요소를 어떻게 부여하는가를 보인다. 즉, C/E Net의 사상(event)과 조건(condition)에 최소값과 최대값을 지정한다. 예를 들면, 네트워크 통신 시스템은 일반적으로 메시지의 최대 전달 시간(Max)안에 전송될 것을 가정한다면 초과시 메시지를 잃어버리고 만다. 또한 전송 선로의 기계적인 특성은 최소 메시지 지연 시간(Min)을 갖는다. 따라서 메시지 전송 시간을 모델링 하기 위하여 최소와 최대 지연 시간의 개념을 가져야 한다. 그림 1에서 사각형은 사상(event)을 표시하고 원은 조건(condition)을 표시

한다.

조건과 사상들에 지정된 값의 의미는 다음과 같다.

① 레이블된 조건 : 만약 한 조건이 시간  $t_0$ 을 가지고 시작한다면 시간은 적어도  $t_0 + \text{Min}$ 이 될 때까지 상태를 유지하고  $t_0 + \text{Max}$ 가 되기 전에 끝나야 한다.

② 레이블이 붙은 사상들 : 만약 한 사상이  $t_0$ 에서 발생했다면 그것의 입력 사전 조건(pre-condition)을  $t_0$ 에 끝내고 그것의 사후 조건(post-condition)으로  $t_0 + \text{Min} \leq t_1 \leq t_0 + \text{Max}$ 를 만족하는 시간  $t_1$ 을 갖는 의미이다. 여기서 조건의 출력 아크(arc)에 레이블을 붙이는 것이 일반적이다. 출력 아크는 한 조건으로부터 한 사상에 이르는 아크를 표시한다. (즉, 플레이스 트랜지션 넬의 경우에는 한 플레이스로부터 한 트랜지션, predicate 트랜지션 넬의 경우에는 한 predicate로부터 한 트랜지션에 이르는 아크를 표시한다.) 이러한 표현을 그림 2에 나타냈다.

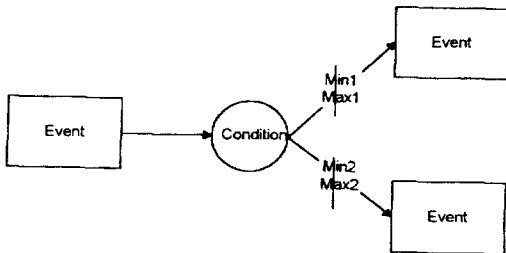


그림 2. 출력 아크를 갖는 시간형 C/E Net  
Fig. 2. Timed C/E net with output arc.

2. Timed Place Transition Net와 Timed Predicate Transition Net

Condition Event Net(C/E Net)은 토큰의 수가 하나 이하인데 반해 (Place Transition Net(PT Net)에서는 하나 이상의 경우도 가능하고 조건과 사상 대신 플레이스와 트랜지션으로 표시한다. 또한 마크 상태에 있어서 각 장소에 존재하는 최대 토큰의 수가 K개 이하라면 이러한 넬을 K-bounded라고 한다. Predicate Net에서는 여러 토큰을 각각 구분하여 토큰들 사이에 주어진 관계가 만족되어야 트랜지션의 점화가 가능한 넬이다. 이러한 넬들도 시간형 C/E Net의 경우와 같이 시간을 부가한 레이블을 사용하여 두 가지 다른 점을 고려한다.

장소와 predicate들은 같은 시간에 여러 개의 토큰을 가질 수 있다. C/E Net의 경우에는 유용한 시간이 토큰에 혹은 조건에 대하여 정의되어 있는지 구분이

없지만, PT net과 Predicate Transition Net(Pre TN)인 경우 이 차이는 문제가 된다. C/E Net 조건과 동일한 Pre TN을 구성하는데 여러 개의 토큰이 필요할 수 있기 때문이다. 페트리넷을 이용하여 복잡한 시스템을 모델링하려면 보다 모델링 능력이 우수한 페트리넷을 선택하여 사용하는 것이 좋다. 그러나 모델링 능력이 우수할수록 그 넬이 갖는 여러 성질을 결정하기는 점점 어렵게 된다. 즉, 모델링은 가능하지만 유용한 결과를 얻을 수 있는 가능성이 줄게 된다. 프로토콜의 분석을 위해 시간형 PT Net가 시간형 Pre TN보다 많이 사용된다. PT Net으로 충분한 통신 프로토콜을 표현할 수 있고 Pre TN의 모델링 능력은 증가되나 넬 분석의 복잡성은 커진다. 많은 연구가 시간형 PT Net에 대하여 진행되었고 통칭하여 이를 시간형 페트리넷(TPN)이라고 부른다. 표 1은 시간형 페트리넷의 종류이다.

표 1. 시간형 페트리넷의 종류  
Table 1. Types of timed Petri nets.

차이점	분류	Timed C/E Net	Timed PT Net	Timed Prt Net
토큰(token)수		1	k개 (k-bound)	k개 (k-bound)
transition 점화		토큰과 조건에 정의구분이 없다(유용한 시간)	토큰들간의 관계 만족	토큰들간의 관계 만족
상대 사용도		.	높다(통신 프로토콜)	낮다(넬 분석의 복잡성이 크다)
transition 점화			입력 place가 유용	입력 predicate가 유용

3. 시간형 퍼지 페트리넷(TFPN)의 정의

시간형 퍼지 페트리넷(TFPN)의 정의는 다음과 같다.

$$TFPN = (P, T, I, O, M_0, \alpha, \beta, \nu) \quad (1)$$

여기서,  $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$  : 플레이스의 유한 집합

$T = \{t_1, t_2, \dots, t_m\}$  : 트랜지션의 유한 집합

$I : T \rightarrow P$  : 트랜지션에 대한 입력 함수(호(arc)로 표현)

$O : T \rightarrow P$  : 트랜지션으로 부터의 출력 함수(호로 표현)

$M_0 : p \rightarrow \{0, 1, 2, 3, \dots\}$  : 초기 마킹

$\alpha = \{ts_i, x_i, y_i\}$  : 트랜지션 i의 점화 지연 시간 퍼지 숫자

(여기서  $ts_i$ 는 전송 매개체의 전송 지

연 시간에 관한 truth scale이며,  $x_i$ 는  
비관적 시간값,  $y_i$ 는 낙관적 시간값)

$\beta = p \rightarrow [0, 1]$  : 분산된 토큰  $i$ 의 초기  
퍼지값

$v = p \rightarrow d$  : 플레이스  $p$ 에서 명제  $d$ 와 연관  
된 함수

표 2는 truth scale과 numerical intervals을 나타  
낸 것이다.

기존의 정규 페트리넷과 시간형 페트리넷들의 구조  
적 특성과 동적 특성들을 그대로 상속받아 퍼지 개념  
을 추가한다.

- (1) 구조적 특성 : 구조상의 특성(Structural live-  
ness, controllability, structural boundness  
등)들을 기존의 분석 방법을 이용한다.
- (2) 동적 특성 : 페트리넷의 동적인 특성(reacha-  
bility, boundness, liveness, reversibility,  
coverability등), 시간적인 특성(성능등)과 불확  
실한 특성(신뢰성 등)은 시간형 퍼지 도달성 그  
래프로부터 분석될 수 있다.

표 2. Truth Scale과 Numerical Intervals  
Table 2. Truth scale and numerical inter-  
vals.

Truth Scale(ts)	Numerical Intervals	중앙값
always true (AT)	[1.00, 1.00]	1
Extremely true (ET)	[0.95, 0.99]	0.97
very true (VT)	[0.80, 0.94]	0.87
considerably true (CT)	[0.65, 0.79]	0.72
moderately true (MT)	[0.45, 0.64]	0.55
more or less true (LT)	[0.30, 0.44]	0.37
minorly true (OT)	[0.10, 0.29]	0.20
minimally true (IT)	[0.01, 0.09]	0.05
not true (NT)	[0.00, 0.00]	0

4. 마킹 및 점화 규칙

토큰을 갖고 있는 시간형 퍼지 페트리넷을 마킹  
(marking)된 시간형 퍼지 페트리넷이라고 하자. 마킹  
된 시간형 퍼지 페트리넷에서, 토큰은 플레이스  $p$ 에서  
• (dot)으로 나타낸다.

또한, 두 명제 사이의 퍼지 관계(Fuzzy Relation)를  
기술한 규칙을 퍼지 생성 규칙이라 하며, 퍼지 생성 규  
칙의 집합을  $R = \{R_1, R_2, \dots, R_k\}$ 이라 하면,  $i$ 번째의 퍼지  
생성 규칙의 일반적인 형태는 다음과 같다.

$$R_i : \text{if } d_i \text{ then } d_k \text{ (CF} = ts_i) \tag{2}$$

여기서,

- ①  $d_i$ 와  $d_k$ 는 “답다”, “높다”, “낮다” 등과 같이 퍼지  
변수를 갖는 명제들을 나타내며, 신뢰도는 0과 1사  
이의 실수 값으로 나타낸다.
- ②  $ts_i$ 는 Certainty Factor(CF)의 값을 나타낸다. 이  
것이 규칙의 신뢰도를 나타내며 값이 클수록 그 규  
칙의 신뢰성이 높아지는 것이다.
- ③  $i$ 는  $1 \leq i \leq m$ 의 범위를 갖는다.  
(각 규칙에는) 불확실성에 따라 주어지는 임계값  
 $tv$ (threshold value)가 부여된다. ( $tv \in [0, 1]$ )  
명제  $d_i$  신뢰도 즉, 토큰  $i$ 의 퍼지값  $\beta_i$ 라 할 때,  
① 만약에  $\beta_i \geq tv$  인 경우,  $R_i : \text{if } d_i \text{ then } d_k$ 는 (CF  
 $= ts_i$ )는 점화(Fire)된다. (이 때  $R_i$ 의 신뢰도는  $\beta_i$   
 $* ts_i$ 가 된다.)  
② 만약에  $\beta_i < tv$  인 경우,  $R_i : \text{if } d_i \text{ then } d_k$ 는 (CF  
 $= ts_i$ )는 점화되지 않는다.

그러므로, 시간형 퍼지 페트리넷을 이용한 마킹 조건  
과 점화 규칙은 다음과 같이 모델링될 수 있다(그림 4  
참조).

만약에  $\beta_i \geq tv$  인 경우

$$R_i : \text{if } d_i \text{ and } d_j \text{ then } d_k \text{ marking}$$

$$a(ts_i, x_i, y_i) = [ts_i * (c_i - x_i), y_i - ts_i * (c_i - x_i)] = [x', y'] \tag{3}$$

여기서,  $C_i$ 는  $c_i = (x_i + y_i) / 2$ 이며,  $x'$ 는 트랜지션  
 $t_i$ 의 소속함수(그림 6참조)에서  $x$ 축의  $x_i$ 와  $y$ 축의  $ts_i$ 와  
만나는 점의 값이며,  $y'$ 는  $x$ 축의  $y_i$ 와  $y$ 축의  $ts_i$ 와 만  
나는 점의 값이다.

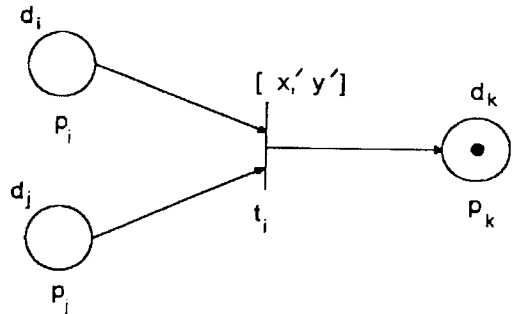


그림 3. 시간형 퍼지 페트리넷  
Fig. 3. Timed fuzzy Petri net.

5. 시간형 퍼지 페트리넷(TFPN)의 모델링  
시간형 퍼지 페트리넷 정의 (1)식에 의하여 표 2의

Fuzzy Subset Term에서 very true(VT)와 비관적 시간값인 2와 낙관적 시간값인 8을 이용하여 시간형 퍼지 페트리넷을 모델화하면 다음과 같다.

$$TFPN = (P, T, I, O, M_0, \alpha, \beta, \nu) \quad (4)$$

- 여기서,  $P = \{p_1, p_2, p_3\}$  : 플레이스의 유한 집합
- $T = \{t_1\}$  : 트랜지션의 유한 집합
- $I(t_1) = \{p_1, p_2\}$  : 플레이스  $p_1$ 과 플레이스  $p_2$ 에서 트랜지션  $t_1$ 으로의 입력 아크의 집합
- $O(t_1) = \{p_3\}$  : 트랜지션  $t_1$ 에서 플레이스  $p_3$ 로의 출력 아크의 집합
- $M_0 = (1, 1, 0)$  : 초기 마킹
- $\alpha = (VT, 2, 8)$  : 트랜지션  $t_1$ 의 점화 지연 시간 퍼지 숫자  
(여기서,  $ts_1$ 는 truth scale(전송 매개체의 전송 지연 시간)이며,  $x_1$ 는 비관적 시간값,  $y_1$ 는 낙관적 시간값)
- $\beta(p_1) = 0.87, \beta(p_2) = 0.97, \beta(p_3) = 0$  : 분산된 토큰  $i$ 의 초기 퍼지값
- $tv = 0.4$  : 불확실성에 따라 주어지는 임계값  $tv$
- $V(p_1) = \text{Start\_Send1}$  : 플레이스  $p_1$ 에서 명제  $d_1$
- $V(p_2) = \text{Start\_Send2}$  : 플레이스  $p_2$ 에서 명제  $d_2$
- $V(p_3) = \text{Wait\_Ack}$  : 플레이스  $p_3$ 에서 명제  $d_3$  (그림 4 참조)

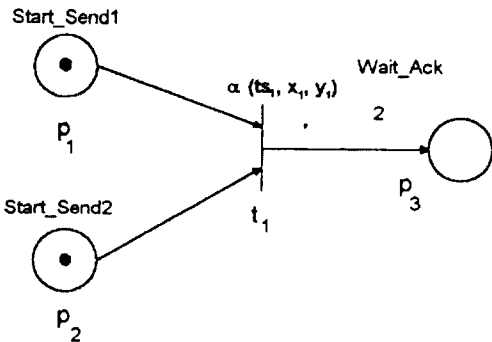
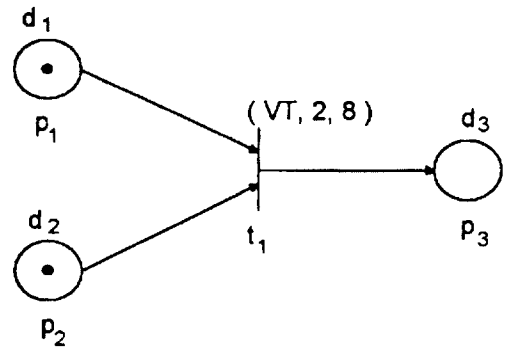
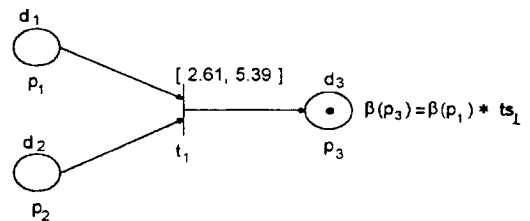


그림 4. 마킹된 시간형 퍼지 페트리넷으로 표현된 통신 활성화  
Fig. 4. Communication activity represented by marking timed fuzzy Petri net.

시간형 퍼지 페트리넷에서 트랜지션은 점화할 수 있으며, 만약 모든  $p_i \in I(t_i), \beta_i \geq tv$  인 경우, 트랜지션은 enable될 수 있다( $tv$ 는 임계값이므로  $tv \in [0, 1]$ ). 트랜지션은 입력 플레이스에서 토큰을 제거하고, 출력 플레이스로 토큰을 보냄으로써 그림 5와 같이 점화될 수 있다. 여기서  $x'$ 는  $ts_i * (c_i - x_i)$ 이며,  $y'$ 는  $y_i - ts_i * (c_i - x_i)$ 이다. 또한 트랜지션  $t_i$ 에도 그림 7과 같이  $x, y$ 를 두점으로 하는 이동변 삼각형 형태의 소속 함수(membership function)와 임계값이 주어진다.



(a)



(b)

그림 5. 마킹된 시간형 퍼지 페트리넷의 점화(firing)  
(a) 트랜지션  $t_1$ 를 점화하기 전의 상태,  
(b) 트랜지션  $t_1$ 를 점화한 후의 상태.

Fig. 5. Firing of marking timed fuzzy Petri net.  
(a) State before firing transition  $t_1$ ,  
(b) State after firing transition  $t_1$ .

그림 6은 트랜지션  $t_i$ 의 소속 함수를 나타낸다. 여기서  $y$ 축은 truth scale( $ts_i$ )을 나타내고,  $x$ 축은 비관적 시간값( $x_i$ )과 낙관적 시간값( $y_i$ )을 나타내며,  $C_i$ 는  $c_i = (x_i + y_i) / 2$ 이다.

또한, 그림 4에서 트랜지션  $t_1$ 에 대한 소속 함수를 상기 그림 5와 그림 6을 이용하여 그림 7로 나타낼 수 있다.

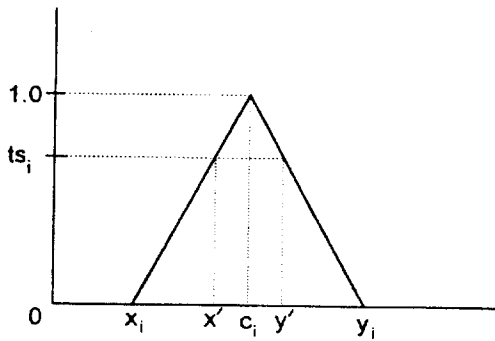


그림 6. 트랜지션  $t_i$ 의 소속 함수  
Fig. 6. Membership function of transition  $t_i$ .

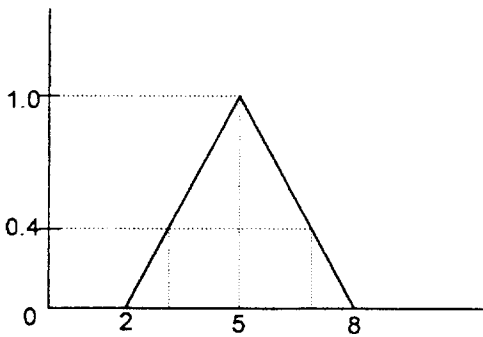


그림 7. 트랜지션  $t_1$ 의 소속 함수  
Fig. 7. Membership function of transition  $t_1$ .

표 3. 퍼지 생성 규칙  
Table 3. Fuzzy production rules table.

형태	퍼지 생성 규칙
type 1	IF $d_j$ THEN $d_k$ (CF = ts)
type 2	IF $d_j$ THEN $d_{k1}$ and $d_{k2}$ and ... and $d_{kn}$ (CF = ts)
type 3	IF $d_{j1}$ and $d_{j2}$ and ... and $d_{jm}$ THEN $d_k$ (CF = ts)
type 4	IF $d_{j1}$ and $d_{j2}$ and ... and $d_{jm}$ THEN $d_{k1}$ and $d_{k2}$ and ... and $d_{kn}$ (CF = ts)
type 5	IF $d_{j1}$ or $d_{j2}$ or ... or $d_{jm}$ THEN $d_k$ (CF = ts)
type 6	IF $d_{j1}$ or $d_{j2}$ or ... or $d_{jm}$ THEN $d_{k1}$ and $d_{k2}$ and ... and $d_{kn}$ (CF = ts)
type 7	IF $d_j$ THEN $d_{k1}$ or $d_{k2}$ or ... $d_{kn}$ (CF = ts)
type 8	IF $d_{j1}$ and $d_{j2}$ and ... and $d_{jm}$ THEN $d_{k1}$ or $d_{k2}$ or ... or $d_{kn}$ (CF = ts)
type 9	IF $d_{j1}$ or $d_{j2}$ or ... or $d_{jm}$ THEN $d_{k1}$ or $d_{k2}$ ... or $d_{kn}$ (CF = ts)

퍼지 생성 규칙의 전제부와 결론부는 and 또는 or와 같은 논리 연결자(logical connector)를 이용하여 두

개 이상의 명제를 합성할 수 있다. 이렇게 합성한 명제가 전제부 또는 결론부에 있는 규칙을 합성 퍼지 생성 규칙이라고 한다. 그리고 논리 연결자가 없는 규칙을 단순 퍼지 생성 규칙이라 하는데, 퍼지 생성 규칙은 일반적으로 표 3과 같이 9가지 형태로 분류할 수 있다.

일반적으로 9가지의 규칙 형태중 지식 공학 분야에서 type 1, type 2, type 3 그리고 type 4형을 사용한다. 시간형 퍼지 페트리넷으로 모델링될 수 있고, 마킹한 시간형 퍼지 페트리넷으로 각각의 규칙에 대한 퍼지 추론 과정을 모델링할 수 있다(플레이스의 접화 조건).

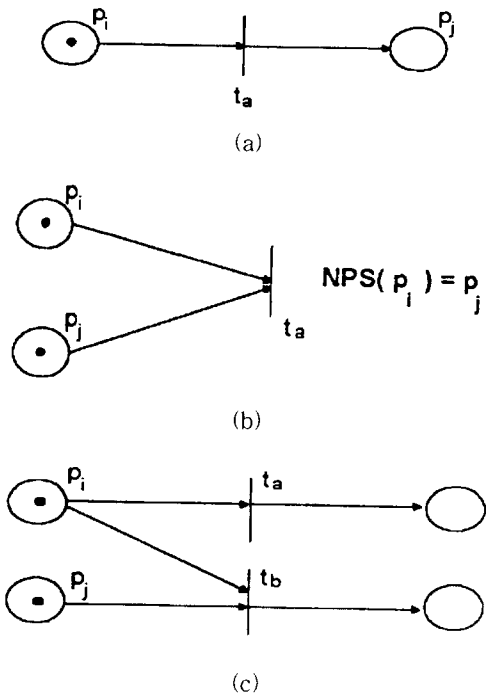


그림 8. (a) 직접 도달 가능 집합, (b) 도달 가능 집합 및 (c) 경합 집합

Fig. 8. (a) Direct reachability set, (b) reachability set and (c) conflict set.

6. 도달 가능 집합(Reachability Set: RS)과 경합 집합(Conflict Set: CS)

$t_a$ 를 트랜지션이라 하고  $p_i$ ,  $p_j$ , 그리고  $p_k$ 를 플레이스라 하자. 만일  $p_i \in I(t_a)$ 이고  $p_j \in O(t_a)$ 라면  $p_j$ 는  $p_i$ 에서 직접 도달 가능하다(directly reachable)라고 한다. 플레이스  $p_i$ 에서 직접 도달할 수 있는 플레이스 집합을 플레이스  $p_i$ 에서 직접 도달 가능 집합(Direct Reachability Set)이라고 하고  $DRS(p_i)$ 로 표시한다.

플레이스  $p_i$ 에서 도달할 수 있는 플레이스의 집합을 플레이스  $p_i$ 의 도달 가능 집합(Reachability Set)이라고 하며,  $RS(p_i)$ 로 표시한다. 만약  $p_i \in I(t_a)$ 와  $p_j \in O(t_a)$ 이면  $p_j$ 를 트랜지션  $t_a$ 에 대한 플레이스  $p_i$ 의 이웃 플레이스 집합(Neighbor Place Set)이라고 하고 NPS( $p_i$ )로 표시한다. 트랜지션  $t_a$ 의 접화가  $t_a$ 에 속하지 않는 다른 트랜지션  $t_b$ 를 접화 불가능하게 할 때 트랜지션 집합  $t_b$ 를 경합 집합이라고 한다. 그림 8은 위의 사항을 설명하고 있다.

IV. 통신 프로토콜의 모델링

간단한 통신 프로토콜의 설계에 있어서 전송지연(transmission delay)이라든가 타임 아웃과 같은 특성을 고려해야만 하며, 동시에 각 노드간의 전송지연을 조정해 줌으로써 보다 원활한 흐름제어(flow control)를 수행할 수 있도록 하여 준다. 그림 9에서는 간단한 프로토콜을 시간형 퍼지 페트리넷으로 모델링한 것이다.

플레이스  $p_1$ 과  $p_6$ 만이 토큰을 하나씩 보유하고 있다면 접화 가능한 트랜지션은 오직  $t_1$ 과  $t_3$ 뿐이다. 여기서  $t_2$ 와  $t_3$ 는 그림 8의 (c)에서 보느바와 같이 경합 집합(conflict set : CS)이라는 것을 알 수 있다. 그러므로,  $t_1$ 과  $t_3$ 가 동시에 접화된다면  $p_1$ 의 토큰이 제거되고  $p_2$ 와  $p_4$ 에 토큰이 놓이게 된다.  $t_3$ 는 접화 지연 시간동안,  $p_4$ 의 토큰이 도착할 때까지 대기하게 된다.  $p_4$ 에 도착한 토큰은  $t_3$ 에서 퍼지 추론에 의해  $p_2$ 와  $p_7$ 에 놓이게 되며, 다시  $t_4$ 가 접화되면  $p_2$ ,  $p_5$ ,  $p_8$ 에 토큰이 놓이게 된다. 그런 후에  $t_2$ 가 접화되면 최종적으로  $p_3$ 와  $p_8$ 에 놓이게 된다.

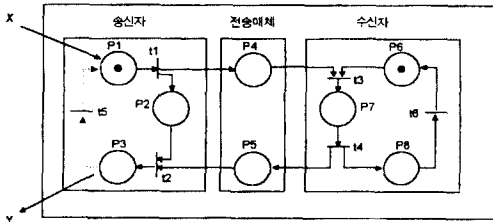


그림 9. 간단한 통신 프로토콜의 시간형 퍼지 페트리넷 모델

Fig. 9. TFPN model for simple communication protocol.

다음 공식 (5)는 그림 9의 통신 프로토콜을 시간형

퍼지 페트리넷으로 나타내었다.

$$TFPN = (P, T, I, O, M_0, \alpha, \beta, \nu) \quad (5)$$

여기서,  $P = \{p_1, p_2, p_3, p_4, p_5, p_6, p_7, p_8\}$  : 통신 프로토콜의 각 상태를 표시한 집합

$T = \{t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, t_6\}$  : 통신 프로토콜에서 메시지를 전달하는데 사용되는 전송 매개체

입력 아크의 집합                      출력 아크의 집합

$$I(t_1) = \{ p_1 \} \quad O(t_1) = \{ p_2, p_4 \}$$

$$I(t_2) = \{ p_2, p_5 \} \quad O(t_2) = \{ p_3 \}$$

$$I(t_3) = \{ p_4, p_6 \} \quad O(t_3) = \{ p_7 \}$$

$$I(t_4) = \{ p_7 \} \quad O(t_4) = \{ p_8, p_5 \}$$

$$I(t_5) = \{ p_3 \} \quad O(t_5) = \{ p_1 \}$$

$$I(t_6) = \{ p_8 \} \quad O(t_6) = \{ p_6 \}$$

$M_0 = (1, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0)$  : 초기 마킹, 현재 통신 프로토콜의 각 플레이스에 존재하는 토큰이며, 각 노드의 진행 상황을 표시해 준다.

다음은 트랜지션  $i$ 의 접화 지연 시간 퍼지 숫자를 퍼지 생성 규칙에 의해 임계값  $tv = 0.40$ 으로 주어지며, 통신 프로토콜에 다음과 같은 Rule Base를 갖는다.

Rule<sub>1</sub> : if  $d_1 \geq tv$  then  $d_2$  and  $d_4$  (CF=VT)

Rule<sub>2</sub> : if  $(d_2 \text{ and } d_5) \geq tv$  then  $d_3$  (CF=VT)

Rule<sub>3</sub> : if  $(d_4 \text{ and } d_6) \geq tv$  then  $d_7$  (CF=VT)

Rule<sub>4</sub> : if  $d_7 \geq tv$  then  $d_5$  and  $d_8$  (CF=VT)

Rule<sub>5</sub> : if  $d_8 \geq tv$  then  $d_6$  (CF=ET)

Rule<sub>6</sub> : if  $d_3 \geq tv$  then  $d_1$  (CF=ET)

트랜지션들은 고정 접화 지연 값을 주었으며, 경합 집합인  $t_2, t_3$ 에 각각의 접화 지연 시간값을 주어 도달성 여부를 판별할 수 있다.

$$a(t_1) = (VT, 0, 2), \quad a(t_2) = (VT, 2, 8)$$

$$a(t_3) = (VT, 2, 4), \quad a(t_4) = (VT, 0, 6)$$

$$a(t_5) = (ET, 0, 10), \quad a(t_6) = (ET, 0, 8)$$

: 여기서,  $ts_i$ 는 truth scale(전송 매개체의 전송 속도(data rate)이며, 일정 시간 동안 한 노드에서 다른 노드로 전송된 데이터 양을 알 수 있으므로 네트워크 상의 각 노드의 데이터 사용량을 알 수 있으며,  $x_i$ 는 비관적 시간값,  $y_i$ 는 낙관적 시간값이다.

$$\beta(p_1) = 0.95, \quad \beta(p_2) = 0$$

$$\beta(p_3) = 0, \quad \beta(p_4) = 0$$

$\beta(p_5) = 0, \quad \beta(p_6) = 0.90$

$\beta(p_7) = 0, \quad \beta(p_8) = 0$

: 각 명제에 대한 초기 신뢰도를 나타내며, 네트워크 프로토콜의 각 노드에 누적된 값이다. 이 값은 어떤 노드에서 다른 노드로 진행시 누적된다.

$v(p_1) = \text{Send\_start} \quad v(p_5) = \text{Buffer\_2}$

$v(p_2) = \text{Wait\_ack} \quad v(p_6) = \text{Receive\_start}$

$v(p_3) = \text{Received\_Ack} \quad v(p_7) = \text{Received\_Signal}$

$v(p_4) = \text{Buffer\_1} \quad v(p_8) = \text{Sent\_Ack}$

: 각 노드나 상태의 명제를 나타내며, 일례로  $p_1$ 에서의 명제 Send\_Start는 송신자가 메시지를 보낼 준비가 되어 있다는 의미이다. 각각의 점화에 따른 전송 지연 신뢰도를 구할 수 있으며, 동시에 경합 집합인 트랜지션에 시간적 구간을 두어 경합 문제와 deadlock현상을 방지하고자 한다.

다음은 그림 9에 대한 직접 도달 가능 집합과 도달 가능 집합을 표 4에 나타내고 이웃 플레이스 집합 (neighbor place set)은 표 5와 같이 나타냈다.

표 4. 그림 9에서  $p_i$ 에서 직접 도달 가능 집합(DRS)과 도달 가능한 집합(RS)

Table 4. Direct reachability set and reachability set for each place  $p_i$  in Fig. 9.

place $p_i$	DRS( $p_i$ )	RS( $p_i$ )
$p_1$	{ $p_2, p_4$ }	{ $p_2, p_3, p_4, p_5, p_7, p_8$ }
$p_2$	{ $p_4$ }	{ $p_3$ }
$p_3$	$\emptyset$	$\emptyset$
$p_4$	{ $p_7$ }	{ $p_3, p_5, p_7, p_8$ }
$p_5$	{ $p_3$ }	{ $p_3$ }
$p_6$	{ $p_7$ }	{ $p_3, p_5, p_7, p_8$ }
$p_7$	{ $p_5, p_8$ }	{ $p_3, p_5, p_8$ }
$p_8$	$\emptyset$	$\emptyset$

표 5. 그림 9에서 각 플레이스  $p_i$ 에 이웃한 플레이스 집합

Table 5. Neighbor place set for each place  $p_i$  in Fig. 9.

place $p_i$	place $p_k$	NPS( $p_i$ )
$p_1$	$p_2$	$\emptyset$
$p_1$	$p_4$	$\emptyset$
$p_2$	$p_3$	{ $p_5$ }
$p_4$	$p_7$	{ $p_6$ }
$p_5$	$p_3$	{ $p_2$ }
$p_6$	$p_7$	{ $p_4$ }
$p_7$	$p_5$	$\emptyset$
$p_7$	$p_8$	$\emptyset$

다음 그림 10은 시간형 퍼지 페트리넷으로 표현한 통신 프로토콜을 점화한 후의 상태를 나타내었다.

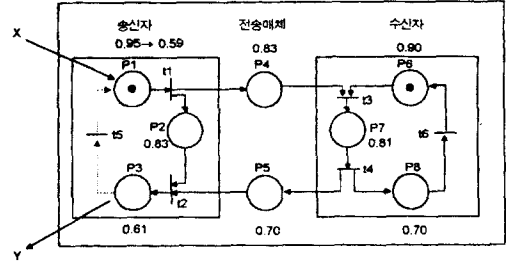


그림 10. 시간형 퍼지 페트리넷에 의한 통신 프로토콜의 점화한 상태  
Fig. 10. Fired communication protocol model with timed fuzzy Petri net.

다음 그림 11는 점화 후의 도달 가능성을 도식화 하였다.

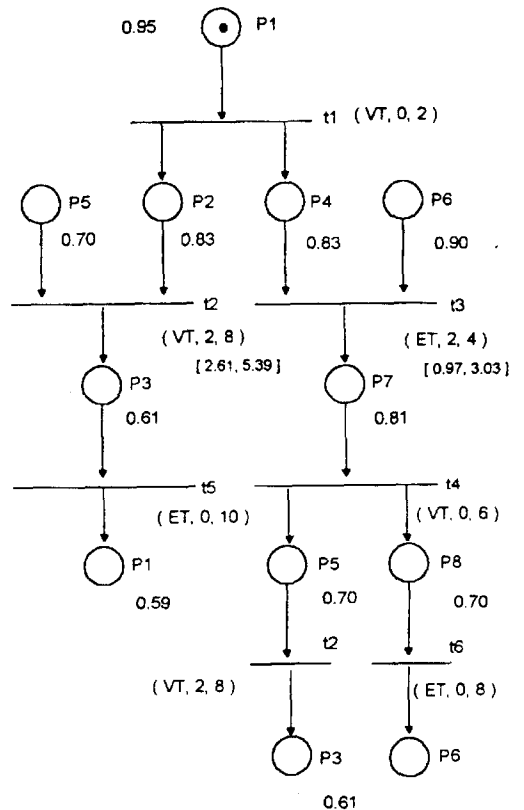


그림 11. 시간형 퍼지 페트리넷의 도식화  
Fig. 11. Marked timed fuzzy Petri net.

$\beta(p_1)$ 의 처음 값은 0.95이었지만 한 번 메시지를 전



송 후에는  $\beta(p_1)$ 의 두 번째 값이 0.59가 되었다. 이는 3장 4절의 마킹 및 점화 규칙에서 설명한 바와 같이 플레이스  $p_1$ 의 초기 신뢰도 0.95를 다음 플레이스의 신뢰도를 구하기 위하여 트랜지션  $t_1$ 의 true scale값  $VT(0.87)$ 를 곱하여 각각  $p_2$ 와  $p_4$ 에 0.83의 신뢰도를 갖게 된다. 다음은 3장 6절의 도달 가능 집합과 경합 집합에서 설명한 경합 집합인 경우 여러 플레이스 중 신뢰도가 낮은 것을 선택하여 다음 플레이스로 전달한다.  $p_4$ 와  $p_6$ 에서  $p_4$ 의 신뢰도를 선택하는 것이다 ( $0.83 \cdot 0.97$ ). 같은 방법으로  $p_7$ 에 전달된 신뢰도는 다시  $p_5$ 와  $p_8$ 에 전달되어( $0.81 \cdot VT(0.87)$ ) 결국  $p_5$ 와  $p_2$ 에서 선택된  $p_5$ 는  $p_3$ 의 신뢰도를 계산할 수 있다 ( $0.70 \cdot 0.87$ ). 최종적으로  $p_1$ 에 도달된 신뢰도는  $0.59$  ( $0.61 \cdot ET(0.97)$ )값을 구할 수 있다.

다시 말해서, 각 트랜지션들의 부정확한 데이터 전송률에 의해 플레이스  $p_1$  명제의 신뢰도가 0.59로 떨어진다.

즉,  $p_1$ 에서 각각의 점화 규칙에 따른 다음 명제의 신뢰도는  $p_2$ 와  $p_4$ 로 전달되는데 송신자는 대기 상태이며, Buffer 1에 메시지를 전달하는 것을 의미한다. 또한 이에 따르는 메시지 전달의 신뢰도를 구할 수 있으며 동시에 점화 지연에 따른 시간값을 구할 수 있다. 수신자에게 전달된 메시지는 Buffer 1을 통하여, 수신자의 수신 시작 메시지( $P_6$ )와 함께 수신된 메시지를 나타낼 수 있다. Buffer 2를 통해 수신 완료 메시지를 다시 송신자에게 전송하여 메시지 전송을 완료하는 것이다.

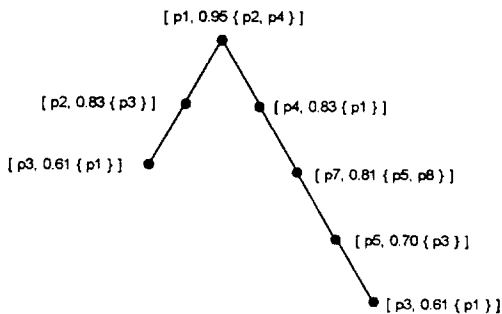


그림 12. 점화 후의 도달성 tree  
Fig. 12. Reachability tree after fire.

시간형 페트리넷인 경우 P4와 P6의 경합 상태에서 단지 시간적인 지연을 주어 두 토큰이 같이 점화하도록 하여 단지 도달 가능성에만 중점을 두었다. 퍼지 페트리넷의 경우는 이를 보완한 신뢰도를 측정하도록 한

것이지만, 시간적인 지연을 고려치 않았다.

따라서 본 장에서는 이들 두 장점을 합하여 단점을 보완한 형태이며, 트랜지션의 퍼지값에 따른 시간의 값을 계산하여 보다 효율적인 점화 규칙을 제시하도록 하였다. 그림 12에서  $p_1$ 에서  $p_3$ 까지는 각각 시작 플레이스와 목표 플레이스이다.

### V. 결 론

본 논문은 지금까지 페트리넷의 확장된 형태인 시간형 페트리넷과 퍼지 페트리넷의 기존 연구를 통하여 병행 실시간 시스템을 모형화하기 위한 시간형 퍼지 페트리넷을 제시하였으며, 이 시간형 퍼지 페트리넷을 이용하여 기존의 통신 프로토콜을 모델링 하였다.

기존의 시간형 페트리넷의 문제점인 conflict 트랜지션을 보완한 간단한 통신 프로토콜을 통하여 정형화된 정의를 제시하려고 했으며, 퍼지 논리 제어를 통해 기존의 불확실성이 내재된 시스템의 상태를 제어하고, 특정 노드에서의 과잉 밀집과 교착 상태(deadlock)를 회피할 수 있도록 하였다.

여기서, 트랜지션의 퍼지 값과 점화 지연 시간을 서로 연결 지어 시간에 의한 소속 함수를 통해 좀 더 명확한 점화 규칙을 제시하게 된 것이다.

또한, 기존의 개념화되어 있거나 다른 설계 기법에 의해 설계된 통신 프로토콜을 시간형 퍼지 페트리넷 모델을 이용하여 모델링하고, 이를 적용하고 분석하여 그 결과로써 필요에 따라 시간형 퍼지 페트리넷 모델을 수정하는 정련화 단계를 거쳐 해석적 분석 결과를 얻을 수 있다.

본 논문의 적용 분야외에 CIM(Computer Integrated Manufacturing)시스템, FMS (Flexible Manufacturing System)에 필요한 사양(specification), 모델링 도구로서 이용될 수 있고, 기타 교통 제어기, 승강기 제어기 등에 간단한 사례 연구가 나와 있으며, 모델링을 통해 실제 퍼지 제어에 필요한 분석이 용이해지리라 생각된다.

본 논문의 향후 연구 과제로는 좀 더 표준화된 퍼지 페트리넷의 정의와 현재까지 제시된 퍼지 페트리넷을 구현할 수 있는 언어를 작성하여 비동기적인 시스템 분석과 시뮬레이션을 수행할 수 있도록 하며, 시스템 모델링시 보다 편리한 GUI(Graphic User Interface)를 완성하는 것이 연구과제로 남아 있다.

## 참 고 문 헌

- [1] 이강수, “페트리넷에 관한 기술 해석,” 정보과학 회지, 1권 2호, pp. 39-47, 1983
- [2] 전명근, 변중남, “Fuzzy Petri net을 이용한 퍼지 추론 시스템의 모델링 및 추론 기관의 구현,” 전자 공학회 논문지, 29권 B편 7호, pp. 30-41, 1992
- [3] 조상엽, 김기태, “퍼지 패트리 넷을 이용한 퍼지 생성 규칙의 표현,” 정보과학회 논문지, 21권 2호, pp. 298-306, 1994
- [4] 이요섭, 박정문, 김성렬, 이철희, “Fuzzy Petri net을 이용한 Communication Protocol의 data control과 modeling,” 정보과학회 학술 발표 논문집, 18권 1호, pp. 203-206, 1991
- [5] 이동호, 통신 프로토콜의 성능 분석을 위한 확장된 Timed Petri Net 모델, 서울대학원 박사 학위 논문, 1988
- [6] S.M. Chen, J.S. Ke, J.F. Chang, “Knowledge representation using Fuzzy Petri nets,” IEEE tran. on Knowledge and Data Engineering, vol. 2, no. 3, pp 311-319, Sep. 1990.
- [7] S.M.Chen, “A knowledge acquisition scheme for rule based systems,” Proceedings of IEEE TENCON, Beijing, pp. 621-625, 1993.
- [8] E.Tazaki, K.Yoshida, “A Fuzzy Petri Net Model for Approximate Reasoning and its Application to Medical Diagnosis,” IEEE International conference on Systems, Manufacturing and Cybernetic, pp. 627-631, 1992.
- [9] T.Cao, A.C.Sanderson, “Task Sequence Planning Using Fuzzy Petri nets,” IEEE International conference on Systems, Manufacturing and Cybernetics, pp. 126-145, 1993.

## 저 자 소 개



尹正模(正會員)

1944년 3월 22일생. 1968년 2월 광운대학교 응용전자공학과 졸업(공학사). 1971년 2월 성균관대학교 경영행정대학원 졸업(경영학석사). 1993년 12월 일본오사카부립대학 대학원(공학박사). 1982년 7월 서울산업대학교 전자계산학과 전임 강사. 1995년 2월 ~ 1997년 2월 서울산업대학교 전자계산소장 겸임. 1995년 10월 ~ 현재 서울산업대학교 전자계산학과 교수. 관심분야는 소프트웨어공학, 객체지향 분석 및 설계, 페트리넷