

Fuzzy-DEVS 형식론을 이용한 이산사건 시스템의 Timing 해석

권 이 완, 김 탁 곤
한국과학기술원, 전기 및 전자공학과
컴퓨터 공학 연구실

대전시 유성구 구성동 373-1
전화 : +42-869-3454
email : {ywkwon, tkim}@coregate.kaist.ac.kr

- 요약 문 -

시스템 개발에 있어 모델의 timing 해석을 위해서는 DEVS(Discrete Event Systems Specification) 형식론을 비롯한 여러 가지 모델링 방법론이 사용되고 있다. 본 논문에서는 DEVS 형식론을 확장한 Fuzzy-DEVS 형식론을 사용한 timing 해석 기법을 제안한다. Fuzzy-DEVS 형식론에서는 상태전이 함수나 시간전진 함수를 퍼지함수화 하였다. 따라서 Fuzzy-DEVS 모델에서의 state sojourn time 은 실수 값이 아닌 퍼지값으로 표현할 수 있다. 제안된 방법은 각단계의 작업 시간이 애매 모호하게 정의된 공정 등의 시간 해석 방법으로 적합하다.

1. 서 론

DEVS 형식론을 사용한 모델링 방법에서는 timing 해석을 위하여 시스템의 한 상태에서 다른 상태로 천이 하는데 걸리는 시간, 즉 state sojourn time 을 실수 값으로 표현한다[1]. 이러한 모델을 사용하여 시간에 관한 논리 검증 혹은 성능 분석을 위해서는 모델의 state sojourn time을 난수화 하여 각 난수(random number)에 대하여 시뮬레이션 한 다음 각각의 시뮬레이션 결과를 종합해서 통계적인 추론을 하게 된다. 이것은 모델링시 시스템의 시간에 대한 동작 상황을 정확하게 알고 있어야 성능분석 등이 제대로 이루어질 수 있음을 뜻한다. 그러나 DEVS 형식론은 상태천이와 상태천이 사이의 시간이 애매 모호하게 정의된 경우의 이산 사건 시스템을 모델링할 수 없었다. 이것을 해결하기 위하여 DEVS 형식론에서 사용되는 crisp 집합이론을 fuzzy 집합으로 확장한 Fuzzy-DEVS 형식론이 제안되었다[4]. Fuzzy-DEVS 형식론에서는 이러한 상태 천이 표현을 위해 fuzzy relation을 정의하고 time advance function을 fuzzy time advance function으로 정의하였다. 관련 연구로서 TPN (Timed Petri Nets)을 확장한 Fuzzy Time Petri Nets이

제안되어 실시간 시스템의 timing 해석과 fault-tolerant 해석에 사용된바 있다[3].

본 논문에서는 Fuzzy-DEVS 형식론의 특성 함수 중에서 시간 전진 함수를 퍼지화 하여 입력의 시간이 퍼지 시간으로 주어지고 state sojourn time 이 퍼지값으로 주어진 시스템의 출력시간의 퍼지 값을 분석하였다.

2. Fuzzy-DEVS 형식론

Fuzzy-DEVS 의 atomic 모델 \tilde{M} 은 다음의 7-tuple 로 구성된다[4].

$$\tilde{M} = \langle X, Y, S, \tilde{\delta}_{int}, \tilde{\delta}_{ext}, \tilde{\lambda}, \tilde{t}_a \rangle$$

X : input events set;

Y : output events set;

S : sequential states set;

$$\tilde{t}_a : S \rightarrow \tilde{N}$$

: fuzzy time advance function,

\tilde{N} = fuzzy number in $R_{0,\infty}$;

$$\tilde{\delta}_{ext} : Q \times X \times S \rightarrow [0,1]$$

: fuzzy external transition function

$$Q = \{(s, \tilde{e}) \mid s \in S, 0 \leq \tilde{e} \leq \tilde{t}_a(s)\}$$

: total state of \tilde{M} ;

$\widetilde{\delta}_{int} : S \times S \rightarrow [0, 1]$
 : fuzzy internal transition function;
 $\widetilde{\lambda} : S \times Y \rightarrow [0, 1]$
 : fuzzy output function.

X 는 입력 사건 집합, Y 는 출력 사건 집합, S 는 시스템의 상태 집합을 나타내고 있다. 4개의 특성 함수 (characteristic function : 외부 입력 천이 함수, 내부 천이 함수, 출력 함수, 시간 전진 함수)는 DEVS 형식론의 crisp 함수 형태로부터 퍼지 함수화가 되어 내부 천이 함수는 퍼지 내부 천이 함수 $\widetilde{\delta}_{int}$ 로 확장되고 외부 천이 함수는 퍼지 외부 천이 함수 $\widetilde{\delta}_{ext}$ 로 확장된다. 마찬가지로 출력함수와 시간 전진 함수도 각각 퍼지 출력함수 $\widetilde{\lambda}$ 와 퍼지 시간 전진 함수 \widetilde{t}_a 로 확장된다.

[정리 1] 퍼지 시간 전진 함수 \widetilde{t}_a 는 DEVS 에서의 시간 전진 함수 t_a 를 포함한다.

<증명>

DEVS 형식론에서 time advance 값을 $r_1 \in R$ 이라고 하면 Fuzzy-DEVS 형식론에서는 r_1 값이 $\mu_{\widetilde{r}}(r_1) = 1$ 로 주어진다. □

DEVS 형식론과 같이 Fuzzy-DEVS 형식론에서도 여러 개의 atomic 모델이 연결되어 한 개의 coupled 모델을 이루고 이 coupled 모델이 모여서 또 다른 coupled 모델을 이루어 계층적 모델링의 특성은 유지된다. 본 논문에서는 coupled 모델에 관해서는 다루지 않는다.

3. Fuzzy timing 해석 이론

시스템을 모델링한 후에 모델의 timing 해석을 하기 위하여 필요한 것은 시스템의 완전한 상태 공간 (complete state space) 과 각 상태에 대한 timing 관련 정보를 가지고 있어야 한다. timing 관련 정보는 각 상태에서의 시간 전진 함수의 값으로 구체화 될 수 있다. 그리고 각 상태에서의 외부 입력 또는 내부 상태 변화에 따른 시스템의 동작을 기술하고 있어야 한다. 이것은

시스템의 dynamic behavior를 표현할 수 있어야 함을 의미한다. 여러개의 외부 사건에 관하여 고려해보면 입력들이 모두 만나야만 하는 경우와 입력들이 순서에 관계없이 모두 들어와야만 하는 경우의 두 가지 경우로 구분하여 모델링할 필요가 있다.

3-1. Buffering이 없는 경우의 Fuzzy Arrival Time

외부 사건들이 모두 만나는 시간이 일치해야 동작을 하는 시스템은 입력에 버퍼기능이 없는 모델로서, 각각의 입력에 대한 시간이 퍼지 시간 값으로 주어지면 입력들이 모두 도착하여 만나는 시간은 입력 퍼지 시간 집합들의 intersection을 구하면 된다. 예를 들어 \widetilde{T}_1 을 한 퍼지입력 시간 집합 그리고 \widetilde{T}_2 를 다른 퍼지입력 시간 집합이라고 하면 다음과 같이 표기할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 \mu_{\tau_1 \cap \tau_2}(\tilde{t}) &= \mu_{\tau_1}(\tilde{t}) \cap \mu_{\tau_2}(\tilde{t}) \\
 &= \text{MIN}(\mu_{\tau_1}(\tilde{t}), \mu_{\tau_2}(\tilde{t})).
 \end{aligned}$$

-----(1)

이것을 일반화하여 n 개의 입력이 동시에 만족되어야 동작이 되는 경우의 연산 식은 아래와 같이 표기가 된다.

$$\begin{aligned}
 \mu_{\tau}(\tilde{t}) &= \bigcap_{i=1}^n \mu_{\tau_i}(\tilde{t}) \\
 &= \text{MIN}(\mu_{\tau_1}(\tilde{t}), \dots, \mu_{\tau_n}(\tilde{t})).
 \end{aligned}$$

-----(2)

식 (2) 연산의 표현을 간략화 하여 연산기호 \otimes 로 대체하여 사용한다. 그러면 식 (1)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\mu_{\tau_1 \cap \tau_2}(\tilde{t}) = \mu_{\tau_1}(\tilde{t}) \otimes \mu_{\tau_2}(\tilde{t}).$$

3-2. Buffering이 있는 경우의 Fuzzy Arrival Time

외부 사건들이 순서에 관계없이 모두 입력되기만 하면 다음 동작이 시작되는 시스템은 입력에 버퍼기능이 있는 모델이다. 이 경우 다음 동작이 시작되는 퍼지 시간은 각 입력의 퍼지 도착 시간을 maximum한 값으로 주어진다. 만약 입력 퍼지 시간이 $\widetilde{T}_1, \widetilde{T}_2$ 로 주어지면 입력들이 모두 들어온 시간은 이들 퍼지 시간 집합의 maximum이고 다음과 같이 표기할 수 있다.

$$\mu_{\max(\tau_1, \tau_2)}(\tilde{t}) =$$

$$\text{MAX}_{\tilde{t} = \max(\tau_1, \tau_2)} [\mu_{\tau_1}(\tilde{t}_1) \wedge \mu_{\tau_2}(\tilde{t}_2)]$$

------(3)

여기서 $x_1 \wedge x_2 \equiv \min(x_1, x_2)$. 식 (3) 연산의 표현을 간략화 하여 연산기호 \odot 로 대체하여 사용하면 식 (3)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\mu_{\max(\tau_1, \tau_2)}(\tilde{t}) = \mu_{\tau_1}(\tilde{t}_1) \odot \mu_{\tau_2}(\tilde{t}_2).$$

[정리 2] 이산사건 시스템에서 두 개이상의 입력이 있고 버퍼기능이 있는 경우 모든 입력이 들어온 다음 동작 시작시간은 이들 입력 도착시간들의 maximum으로 주어지고, 입력 도착시간이 퍼지시간으로 주어지면 입력시간들의 퍼지 최대값이 다음 동작 시작시간으로 되며 입력 도착시간이 crisp한 경우를 포함한다.

<증명> 이산사건 시스템에서 두 입력들이 도착된 시간 $t_1, t_2 (\in \mathbb{R})$ 의 최대값이

$$t_2 = \max(t_1, t_2) \text{ 이라면, 식 (3)에서}$$

$$\mu_{\tau_1}(t_1) = 1, \mu_{\tau_2}(t_2) = 1 \text{으로 주어지고}$$

$$\mu_{\max(\tau_1, \tau_2)}(t_2) = \text{MIN}(\mu_{\tau_1}(t_1), \mu_{\tau_2}(t_2)) = 1 \text{이다. } \square$$

3-3. Fuzzy Delay Time

외부 입력 사건들이 모델의 다음동작을 진행할 수 있다면 출력 사건이 일어나는 시간 값은 현재의 상태에 이르기까지의 시간에 시간 전진 값을 합하여 얻을 수 있다. 현재 상태의 시간이 퍼지 시간 값 \tilde{T}_1 으로 주어지고 시간 전진 함수의 값도 퍼지 시간값 \tilde{T}_2 로 주어지는 경우에는 퍼지 합산을 하여야 한다.

$$\mu_{\tau_1(+)\tau_2}(\tilde{t}) = \text{MAX}_{\tilde{t} = \tau_1 + \tau_2} [\text{MIN}(\mu_{\tau_1}(\tilde{t}_1), \mu_{\tau_2}(\tilde{t}_2))]$$

------(4)

식 (4) 연산의 표현을 간략화 하여 연산기호 \odot 로 대체하여 사용한다. 두 변수의 퍼지 덧셈 연산은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\mu_{\tau_1(+)\tau_2}(\tilde{t}) = \mu_{\tau_1}(\tilde{t}_1) \odot \mu_{\tau_2}(\tilde{t}_2).$$

[정리 3] 퍼지 도착시간에서 퍼지 지연시간을 경과한 후에 출력되는 퍼지 출력시간은 이산사건 시스템에서 입력 도착후 시간전진 함수값 경과 후에 출력이 나오는 시간을 포함한다,

<증명> 이산사건 시스템에서 출력이 나오는 시간은 입력도착 시간값 t_1 과 시간전진 함수값 t_a 의 합으로 표시된다. $t_d = t_1 + t_a$. 식 (4)에서

$$\mu_{\tau_1}(t_1) = 1, \mu_{\tau_2}(t_a) = 1 \text{이라고 하면}$$

$$\mu_{\tau_1(+)\tau_2}(t_d) = \text{MIN}(\mu_{\tau_1}(t_1), \mu_{\tau_2}(t_a)) = 1 \text{이다. } \square$$

4. Fuzzy-DEVS 모델링

그림 1 은 timing 분석을 위한 간략화된 차량용 트랜스 미션의 조립공정이다. 이 공정은 먼저 창고에서 두 종류의 기어 A, B를 반출하여 각각 washing 공정을 거쳐 pre-assembling 공정에서 기어 A와 B를 조립한다. 이렇게 조립된 기어는 창고로부터 반출하여 washing 공정을 지나온 미션 case에 조립하여 완성된 미션을 만든다. 이 공정은 그림 2 와 같이 Fuzzy-DEVS 모델로 만들 수 있다.

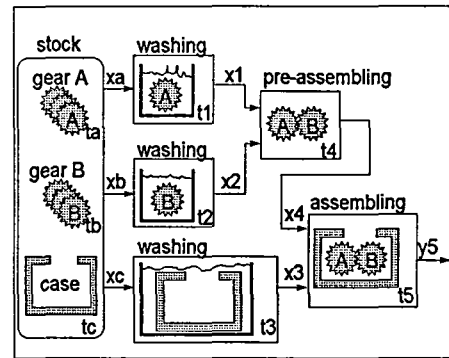


그림 1 기어 및 미션 조립 공정 예

그림 2 에서 stock모델은 기어 A 와 B, 그리고 케이스를 창고로부터 반출하는 것을 나타내고 각각의 부품(gear A, gear B, case)은 genr-A, genr-B, genr-C 라는 부품 생성기로부터 독립적으로 반출된다. 각각 반출되는 시간 값은 퍼지 시간 $\tilde{t}_a, \tilde{t}_b, \tilde{t}_c$ 로 나타낸다. stock의 부품 생성기 모델 genr 로부터 만들어진 부품 A, B, C들은 각각의 wash모델로 입력이 되고 washing 처리 시

간도 역시 퍼지 시간 값으로 가지며 각각 $\tilde{t}_1, \tilde{t}_2, \tilde{t}_3$ 로 주어진다. 각 wash모델의 출력은 y_1, y_2, y_3 으로 나오게 된다. y_1 과 y_2 는 pre-assembly 모델로 입력된 후 조립되고 퍼지 시간 \tilde{t}_4 후에 y_4 로 조립된 기어세트가 출력된다. 이 y_4 의 출력과 케이스의 washing후의 출력인 y_3 는 최종 조립 단계인 main-assembly 모델로 입력되고 퍼지 시간 \tilde{t}_5 후에 최종 조립된 트랜스미션을 y_5 로 출력한다.

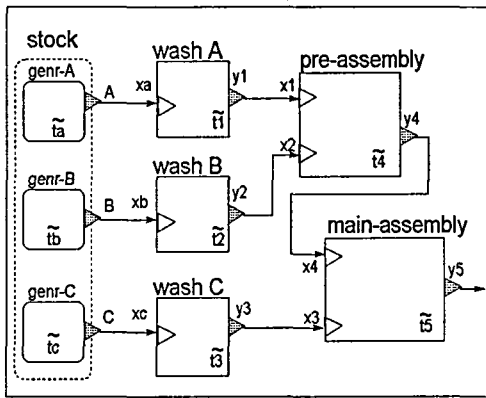


그림 2 예제의 Fuzzy-DEVS 모델

예제에 사용된 fuzzy atomic 모델은 부품 생성기 genr모델과 wash 모델, 그리고 pre-assembly 모델과 main-assembly 모델로 이루어져 있으나 pre-assembly 모델과 main-assembly 모델은 같은 동작을 수행하므로 3 종류의 모델로 구성된다. pre-assembly 모델은 Fuzzy-DEVS 형식론을 사용하면 그림 3 과 같은 상태 천이 다이어그램을 가지는 atomic 모델 \widehat{PRE} 은 다음과 같이 기술할 수 있다.

$$\begin{aligned} \widehat{PRE} &= \langle X, Y, S, \delta_{int}, \delta_{ext}, \lambda, \tilde{t}_a \rangle \\ X &= \{x_1, x_2\}; \\ Y &= \{y_4\}; \\ S &= \{s_0, s_1, s_2, s_3\}; \\ \delta_{int} : S &\rightarrow S, \\ \delta_{int}(s_3) &= s_0; \\ \delta_{ext} : S \times X &\rightarrow S, \\ \delta_{ext}(s_0, x_1) &= s_1, \\ \delta_{ext}(s_0, x_2) &= s_2, \\ \delta_{ext}(s_1, x_2) &= s_3, \\ \delta_{ext}(s_2, x_1) &= s_3; \\ \lambda : S &\rightarrow Y, \\ \lambda(s_3) &= y_4; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \tilde{t}_a : S &\rightarrow \tilde{N} \\ t_a(s_0) &= \infty, \\ t_a(s_1) &= \infty, \\ t_a(s_2) &= \infty, \\ t_a(s_3) &= \tilde{t}_4. \end{aligned}$$

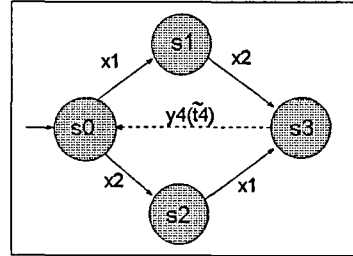


그림 3 pre-assembly 모델의 상태 천이 다이어그램

DEVS 형식론과는 다르게 시스템의 상태가 s_3 인 경우의 시간 전진 함수의 값이 퍼지 시간 값 \tilde{t}_4 로 주어짐을 알 수 있다. 이 pre-assembly 모델에서는 두 개의 입력이 주어진 경우의 작업 시간을 퍼지화 하여 fuzzy time 으로 표현했다. 본 예제에는 모델의 timing 분석을 위하여 4개의 특성함수들 가운데 시간 전진 함수만을 퍼지화 하였다. main-assembly 모델 \widehat{MAIN} 의 경우에도 pre-assembly 모델과 같은 형태를 가지고 다만 퍼지 시간 값이 \tilde{t}_5 로 주어지는 것이 달라지므로 별도의 표현은 생략한다. Genr모델은 그림 4 와 같은 상태 천이 다이어그램을 가지고 있으며 계속해서 active 상태에서 퍼지 시간 $\tilde{t}_a, \tilde{t}_b, \tilde{t}_c$ 값 후에 A, B, C의 출력을 각각에 해당되는 wash 모델의 입력 x_a, x_b, x_c 로 보낸다. Genr 모델의 Fuzzy-DEVS 형식론으로의 표현은 생략한다.

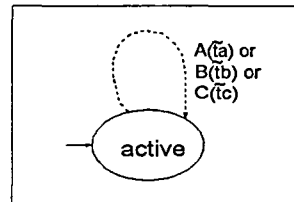


그림 4 genr 모델의 상태 천이 다이어그램

Wash모델은 그림 5의 상태 천이 다이어그램에서와 같이 입력 x_i 가 들어오면 wash 상태로 들어간 후 시간 전진 함수의 값이 퍼지 시간 \tilde{t}_i 로

주어지고 그 시간 후에 출력 포트로 y_i 사건을 내보낸다. 출력 사건이 일어나는 시간은 입력 사건 x_i 에 주어지는 시간과 wash 모델의 시간 전진 함수의 값과의 퍼지 덧셈 연산으로 이루어지므로 수식 (4) 과 같은 연산을 수행해야 한다. 이것을 수식으로 표현하면

$\tilde{t}(y_i) = \tilde{t}(x_i) \odot \tilde{t}_i; (i=1,2,3)$ 이 된다. 여기서, $\tilde{t}(m)$ 은 사건 m 이 발생하는 퍼지 시간을 의미한다.

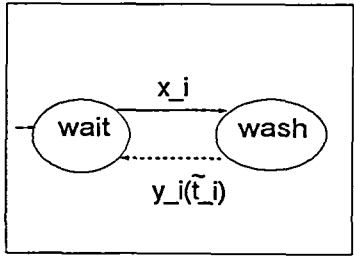


그림 5 wash 모델의 상태 전이 다이어그램 ($i=1,2,3$)

5. Fuzzy-DEVS 모델의 timing 해석

주어진 조립 공정 모델에서 timing 해석을 하기 위해서 퍼지 시간 값들은 미리 주어지는데 모델에서는 그림 6 과 같이 사다리꼴 퍼지 숫자로 주어진다고 가정했다.

사다리꼴 퍼지숫자의 표현은

$\tilde{t}_a = (a_1, a_2, a_3, a_4)$ 로 나타내고 여기서 $a_1 \leq a_2 \leq a_3 \leq a_4$ 이며 $[a_1, a_4]$ 는 구간의 끝으로 소속함수값이 0이고 $[a_2, a_3]$ 은 중간 값들로 소속함수값이 1이 되는 구간인 퍼지숫자를 나타낸다.

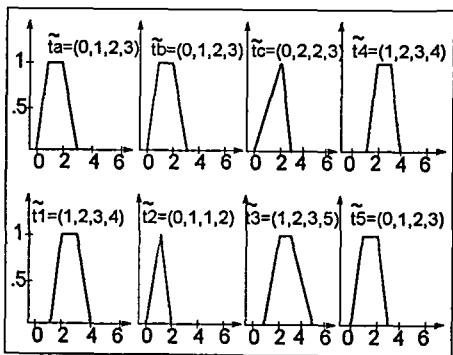


그림 6 예제에서 사용된 $t_a, t_b, t_c, t_1, t_2, t_3, t_4, t_5$ 의 퍼지 시간값

이렇게 주어진 경우 washing이 끝나는 부품 A와 B 그리고 C는 그림 7 과 그림 8 그리고 그림 9 에서와 같이 두 퍼지 시간 값의 덧셈연산 식 (4) 의 연산을 수행한다. 각각의 washing 작업의 결과 얻어지는 y_1, y_2, y_3 의 시간 값은 다음 모델의 입력 x_1, x_2, x_3 으로 연결되고 다음과 같은 연산으로 값을 구한다.

$$\begin{aligned} \tilde{t}(y_1) &= \tilde{t}_a \odot \tilde{t}_1 = (1, 3, 5, 7), \\ \tilde{t}(y_2) &= \tilde{t}_b \odot \tilde{t}_2 = (0, 2, 3, 5), \\ \tilde{t}(y_3) &= \tilde{t}_c \odot \tilde{t}_3 = (1, 4, 5, 8). \end{aligned}$$

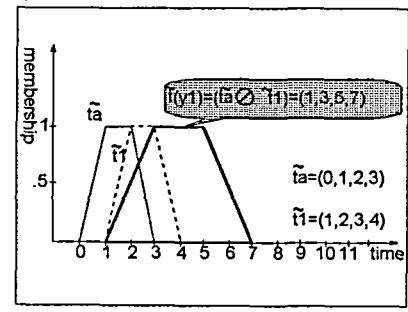


그림 7 wash-A모델에서 출력 y_1 이 발생하는 퍼지 시간

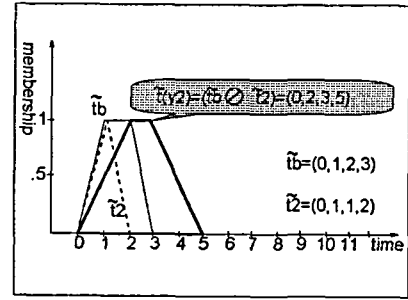


그림 8 wash-B모델에서 출력 y_2 가 발생하는 퍼지 시간

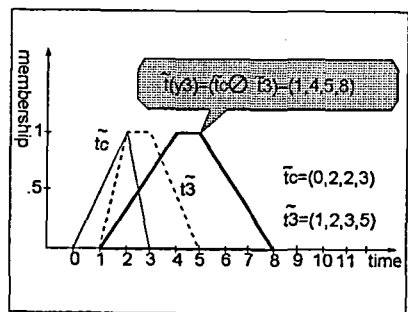


그림 9 wash-C모델에서 출력 y_3 가 발생하는 퍼지 시간

그리고 x_1 과 x_2 가 pre-assembly 모델로 입력

이 되면 그림 10 에서와 같이 두 개의 입력 값의 최대 연산을 수행하는데 식 (3)의 연산이 수행된다. 그 연산 결과 값과 pre-assembly모델의 내부 시간 \tilde{t}_4 를 덧셈 연산하면 식 (4)의 연산을 하게 되고 y_4 에 대하여 그림 11 과 같은

$$\tilde{t}(y_4) = (\tilde{t}(x_1) \odot \tilde{t}(x_2)) \oplus \tilde{t}_4 = (2, 5, 8, 11)$$

값을 얻는다.

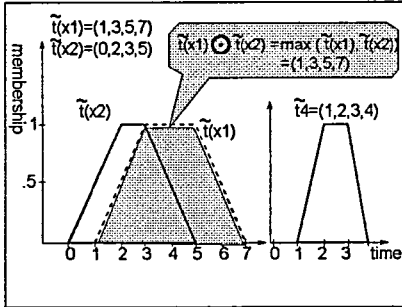


그림 10 pre-assembly모델에서 출력 y_4 가 발생되는 퍼지시간

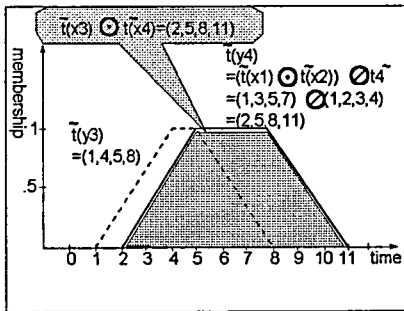


그림 11 main-assembly모델로 들어오는 입력 x_3 과 x_4 의 퍼지 시간

출력 y_4 ($= x_4$)와 미션 케이스 washing 작업후의 x_3 은 main-assembly 모델의 입력으로 들어간다. x_4 와 x_3 의 시간 값의 최대연산 결과 값과 \tilde{t}_5 의 퍼지 덧셈 연산 후에 얻어지는 최종 조립된 미션 y_5 는 그림 12 에서와 같이 구해진다.

$$\tilde{t}(y_5) = (\tilde{t}(x_3) \odot \tilde{t}(x_4)) \oplus \tilde{t}_5 = (2, 6, 10, 14)$$

이것은 기어 A, B가 동시에 조립되고 그 조립된 결과 물을 미션 케이스와 같이 조립한 최종 미션의 완성품이 2 부터 14 까지의 시간 구간에서 발

생 가능하고 6 과 10 구간에서 최대의 소속 함수 값 1을 가진다는 것을 의미한다. 즉 6과 10의 시간 구간에서 가능성이 제일 큰 것을 알 수 있다.

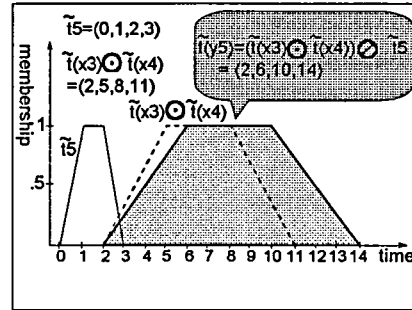


그림 12 main-assembly 모델의 최종출력 y_5

6. 결론

Fuzzy-DEVS 형식론을 사용하여 이산 사건 시스템의 fuzzy timing 해석 방법을 제안하였다. 제안된 방법은 시스템의 모델링시 상태 천이 사이의 시간 값이 불확실한 경우의 시간 분석에 유용하다. 간단한 예제를 통하여 제안된 방법의 유용성을 보였다. 본 논문에서는 연속해서 입력이 발생하는 경우에 퍼지 시간의 스케줄링에 관하여 고려를 하지 않았지만 이것에 대해서는 앞으로 연구를 계속 해야 할 것이다.

참고 문헌

- [1] Zeigler B.P., *Multifaceted modelling and discrete event simulation*, Academic Press Inc., London, England, 1984.
- [2] Zimmermann H.J., *Fuzzy Set Theory - and Its Applications 2nd Ed.*, Kruwer Academic Pub., Norwell, U.S.A., 1991
- [3] Jorge C.A. de Figueiredo, Angelo Perkusich, "Faults and timing analysis in real-time distributed systems: A fuzzy time Petri-net-based approach", *Fuzzy sets and systems*, No. 83, 1996, pp. 143-168.
- [4] Kwon, Y.W. and Tag Gon Kim, et al., "Fuzzy-DEVS Formalism: Concepts, Realization and Applications", *AI, Simulation, and Planning in High Autonomy Systems*, Proc. of 6th Annual Conf., Mar. 1996., pp. 227-234.