

MUIO와 Shortest Path를 이용한 개선된 시험순서생성

正會員 정 윤 희*, 홍 범 기*

Test Sequence Generation Using MUIO and Shortest Paths

Yoon-Hee Jung*, Beom-Kee Hong* *Regular Members*

요 약

본 논문에서는 최소 길이의 시험 순서를 생성하는 새로운 방법을 제안한다. 시험의 길이는 symmetric test graph의 edge의 갯수와 같다는 사실로부터, MUIO와 shortest path를 이용하여 최소의 갯수를 갖는 symmetric test graph를 구하는 방법을 제안한다. 제안한 방법은 Shen이 제안한 MUIO를 이용하는 방법을 수정한 것으로, 기존의 방법보다 shortest path를 구해야 하는 계산시간이 더 필요하지만 1.0~9.8% 정도 개선된 시험 순서를 구할 수 있다. 또한 기존의 방법과는 달리 FSM으로부터 직접 symmetric test graph를 구할 수 있는 장점이 있다.

ABSTRACT

This paper introduces an algorithm which uses MUIO and the shortest paths to minimize the length of test sequence. The length of test sequence is equal to the total number of the edges in a symmetric test graph G^* . Therefore, it is important to make a G^* with the least number of the edges. This algorithm is based on the one proposed Shen[2]. It needs the complexity to make shortest paths but reduces the test sequence by 1.0~9.8% over the Shen's algorithm. And this technique, directly, derives a symmetric test graph from an FMS.

I. 서 론

프로토콜 구현물들의 호환성 및 상호 연동성을 증가시키기 위하여 표준에 정의된 규격과 일치하는지를 시험하여야 한다. 일반적으로 프로토콜 구현물들은 일련의 입력을 적용하여 이로 부터 얻은 출력들이

규격에서 기대하는(expected) 출력들과 일치하는지를 비교하는 적합성 시험을 수행한다.

최근에 프로토콜 적합성 시험을 위하여 시험 순서를 생성하는 여러 가지 방법들이 제안되어 왔다. [1]에서는 프로토콜 구현물이 기대하는 상태에 있는지를 검증하기 위한 방법으로 Unique Input/Output(UIO or SUIO)을 이용하는 것을 제안하였다. [2]에서는 각 상태에 대하여 multiple minimum-length UIO sequence (MUIO)를 사용하는 것을 제안하였는데, 이 방법은 SUIO를 이용하는 것보다 4%~37%정도 시험 길이를

*한국전자통신연구소
Electronics and Telecommunication Research Institute
論文番號:94354-1207
接受日字:1994年 12月 7日

줄일 수 있다.

본 고에서는 시험 순서를 구하기 위하여 MUIO와 shortest path(MUSP)들을 이용하는 새로운 방법을 제안한다. 그 결과 기존의 방법보다 계산 시간을 크게 증가하지 않고 시험의 길이를 줄였다.

본 고의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 Rural Chinese Postman/UIO(or MUIO)를 이용하여 시험 순서를 구하는 방법과 관련된 용어를 기술한다. 3장에서는 MUSP를 이용하는 새로운 방법을 제안하고 시뮬레이션 결과를 보여 준다. 끝으로 4장에서는 결론을 기술한다.

II. 시험 순서 생성 방법

일반적으로 프로토콜의 적합성 시험은 프로토콜의 상태 천이도의 모든 edge를 시험하여야 한다. 상태천이도는 directed graph $G=(V, E)$ 에 의해 Finite State Machine(FSM)으로 표현될 수 있다. FSM의 한 예를 그림 1에 나타내었다. a 입력과 o 출력을 가진 edge는 $(V_i, V_j; a/o)$ 로 표현할 수 있다.

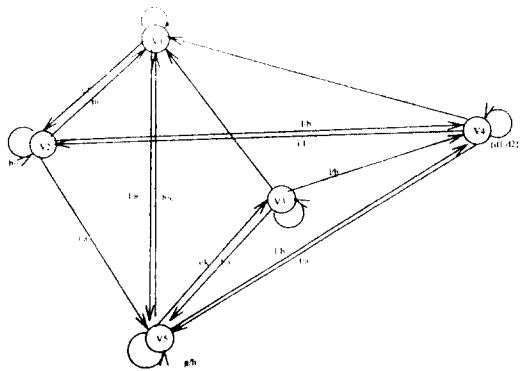


그림 1. FSM의 한 예; -null output, $\{d_1, d_2\}$ 의 길이 2.
Fig. 1 A graph representation of an FSM; -represents null output and the length of $\{d_1, d_2\}$ is two.

FSM으로 표현된 프로토콜의 적합성시험은 모든 edge들을 시험하는 것으로써, edge $(V_i, V_j; a/o)$ 를 시험한다고 가정하면, 크게 다음의 3가지의 단계를 수행한다. 첫번째 단계는 FSM의 상태를 상태 V_i 로 가

게 한다. 두번째는 FSM에 입력 a 를 적용하여 출력 o 를 체크한다. FSM에 의해 만들어진 출력이 규격과 일치하지 않으면 시험은 실패하고, 일치하면 FSM이 새로운 상태 V_j 로 천이하였는지를 확인하는 세번째 단계를 수행한다.

[1]에서는 위에서 언급한 세번째 단계를 수행하기 위하여 UIO의 사용을 제안하였다. 그림 1에 주어진 FSM의 임의의 UIO를 표 1에 나타내었다.

표 1. 그림 1의 FSM에 대한 SUIO.

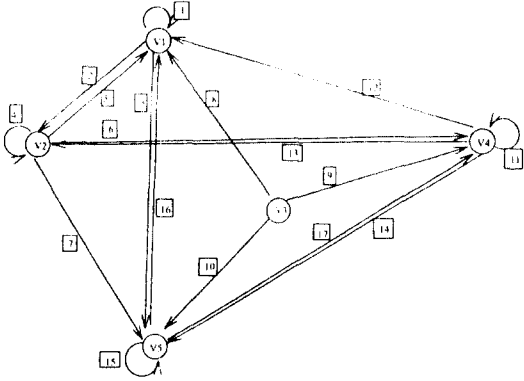
Table 1. SUIO Sequence for the FSM Shown in Fig. 1

State	SUIO Sequence	Tail
V_1	a/b	V_1
V_2	b/-	V_2
V_3	f/a, g/h	V_5
V_4	{d1, d2}/j	V_4
V_5	g/h	V_5

적합성 시험을 위한 시험 순서 생성 절차는 크게 다음의 3단계를 수행한다[1]. 먼저 test edge들로 구성된 test graph $G'=(V, E_c)$ 를 구한다. 여기서 test edge는 G 의 edge의 입력에 그 edge의 목적지(tail)를 확인하는 입력(UIO적용)을 결합하여 만든 새로운 edge를 말한다. E_c 의 각 edge는 G 의 각 edge에 하나씩 매핑되면 다음과 같이 나타낼 수 있다. $E_c = \{(V_i, V_k; a/o \cdot UIO_j) : (V_i, V_j; a/o) \in E \text{ and } \text{tail}(UIO_j) = V_k\}$. 표 1을 이용하여 구한 그림 1에 대한 G' 은 그림 2에 나타내었다.

두번째는 G 의 edge를 몇개 추가하여 test graph G' 를 symmetric하게 만든다. 이때 만들어진 새로운 그래프를 symmetric test graph G^* 라 하자. G^* 의 edge의 총 갯수는 최소가 되어야 하고, 각 상태의 in-degree와 out-degree는 같아야 한다(그러므로 symmetric이라 한다). 그림 2에 대한 G^* 은 V_1 에서 V_2 로, V_1 에서 V_3 로, 그리고 V_5 에서 V_3 로 각각 1,1,4개의 edge를 추가하여 구할 수 있다. 다음에는 위에서 구한 symmetric test graph로부터 Euler tour를 찾는다. 그 결과 시험 순서를 표 2에 나타내었다.

[2]에서는 각 상태에 최소길이의 UIO가 여러개 있을 수 있으며, 적절한 UIO의 선택은 시험의 길이를 줄일 수 있다는 사실로부터 MUIO의 사용을 제안하



- | | | |
|---------------------------|------------------------------|---------------------------------|
| 1. {a/b, a/b}, {m/-, a/b} | 7. {f/a, b/h} | 12. {c/-, a/b} |
| 2. {i/f, b/-} | 8. {b/c, a/b} | 13. {i/f, b/-} |
| 3. {f/a, g/h} | 9. {l/b, {d1, d2}/j} | 14. {f/a, g/h} |
| 4. {b/-, b/-} | 10. {{d1, d2}/e, f/a, g/h} | 15. {g/h, g/h}, {i/k, f/a, g/h} |
| 5. {m/-, a/b} | 11. {f/a, g/h} | 16. {b/c, a/b} |
| 6. {l/b, {d1, d2}/j} | 12. {{d1, d2}/j, {d1, d2}/j} | 17. {l/b, {d1, d2}/j} |

그림 2. 그림 1에 대한 G'.

Fig. 2 The graph G' for the graph shown in Fig. 1.

표 2. SUIO를 이용하여 구한 그림 1의 시험순서
Table 2. An Conformance Test Sequence for the FSM Shown in Fig. 1(To be Read from Left to Right)

{a/b, a/b}, {m/-, a/b}, {i/f, b/-}, {b/-, b/-}, {m/-, a/b}, i/f, {l/b, {d1, d2}/j}, {{d1, d2}/j}, {d1, d2}/j}, {i/f, b/-}, {f/a, g/h}, {g/h, g/h}, {i/k, f/a, g/h}, {b/c, a/b}, {f/a, g/h}, i/k, {b/c, a/b}, f/a, i/k, {{d1, d2}/e, f/a, g/h}, i/k, {f/a, g/h}, i/k, {l/b, {d1, d2}/j}, {f/a, g/h}, {l/b, {d1, d2}/j}, {v/-, a/b}, Total = 54 inputs
--

였다. 그림 1에 주어진 FSM의 MUIO를 표 3에 나타내었다.

$\zeta(V_i)$ 를 E_C 에서 V_i 로 들어오는 edge의 갯수와 V_i 에서 나가는 edge 갯수의 차이, 즉 $\zeta(V_i) = d_{in}^{Ec}(V_i) - d_{out}^{Ec}(V_i)$ 라 하자. 만약 모든 상태에서 $\zeta(V_i) = 0$ 이면 G^* 를 만들기 위해 G' 에 어떤 edge도 첨가될 필요가 없다. 그러나 $\zeta(V_i) \neq 0$ 인 상태가 있으면, G^* 를 만들기 위해 G' 에 몇몇 edge가 첨가되어야 한다.

상태 V_j 에서 minimum-length UIO sequence의 갯수가 $\gamma_j (> 0)$ 개 있다고 하자. UIO_j^i 를 상태 V_j 에서 V_i

를 목적지로 갖는 UIO라 하고, $MUIO_j = \{UIO_j^1, \dots, UIO_j^{\gamma_j}\}$ 라 하자. 그러면 multiple UIO sequence 할당 문제는 각 edge $(V_i, V_j) \in E$ 에 대하여 $\sum_{i=1}^n |\zeta(V_i)|$ 를 최소로 하는 $UIO_j^i \in MUIO_j$ 를 찾는 것과 같으며 다음의 절차를 따른다[2].

G 가 주어졌을때, Graph $G_M = (V_M, E_M)$ 를 구한다. 여기서,

$$V_M \equiv \{S, T\} \cup V_X \cup V_Y,$$

$$V_X = \{X_1, X_2, \dots, X_n\} \text{ 그리고 } V_Y = \{Y_1, Y_2, \dots, Y_n\}.$$

$$E_M \equiv E_S \cup E_T^- \cup E_T^+ \cup E^\wedge,$$

$E_S = \{(S, X_i); X_i \in V_X\}$, $E_T^- = \{(Y_j, T); Y_j \in V_Y\}$, $E_T^+ = \{(Y_j, T); Y_j \in V_Y\}$, 그리고 $E^\wedge = \{(X_i, Y_j): \text{There exists } UIO_j^i\}$. $(S, X_i) \in E_S$ 인 edge는 0 비용(cost)과 $d_{in}^E(V_i)$ 용량을 갖고 $(Y_j, T) \in E_T^-$ 인 edge는 -1 비용과 $d_{out}^E(V_j)$ 용량을 갖는다. $(Y_j, T) \in E_T^+$ 인 edge는 -1 비용과 무한 용량을 갖는다. $(X_i, Y_j) \in E^\wedge$ 인 edge는 0 비용과 무한 용량을 갖는다. 그림 1에 대한 G_M 은 그림 3에 나타내었다.

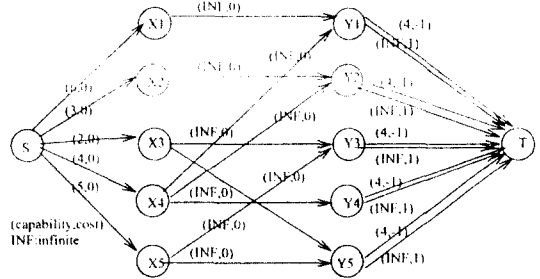


그림 3. 그림 1에 대한 G_M .

Fig. 3 The graph G_M for the FSM of Fig. 1.

G_M 의 flow F는 비용으로

$$\sum_{(Y_j, T)^+ \in E_T^+} F(Y_j, T)^+ - \sum_{(Y_j, T)^- \in E_T^-} F(Y_j, T)^-$$

를 가지며 다음의 수식을 만족한다고 하자.

$$F(S, X_i) = \sum_{(X_i, Y_j) \in E^\wedge} F(X_i, Y_j) \quad \text{for } X_i \in V_X \quad (1)$$

$$\begin{aligned}
 F(Y_j, T)^+ + F(Y_j, T)^- &= \sum_{(X_i, Y_j) \in E^+} F(X_i, Y_j) \quad \text{for } Y_j \in V_Y \quad (2) \\
 F(S, X_i) &\leq d_{in}^E(V_i) \quad \text{for } (S, X_i) \in E_S \quad (3) \\
 F(Y_j, T)^- &\leq d_{out}^E(V_j) \quad \text{for } (Y_j, T) \in E_T^- \quad (4)
 \end{aligned}$$

G_M 의 minimum-cost maximum flow f 가 주어졌을 때 MUJO sequence 할당 문제는 V_i 로 들어오는 edge에 UIO_i^j 를 $f(X_i, Y_j)$ 개 할당하여 test graph G' 를 구하는 것과 같다[2].

표 3의 MUJO를 이용하여 그림 1의 시험 순서는 그림 4에 나타난 수식으로부터 얻을 수 있다.

표 3. 그림 1에 대한 MUJO
Table 3. The Multiple UIO's for the FSM Shown in Fig. 1

State	UIO Sequence	Tail
V_1	a/b	V_1
V_2	b/-	V_2
V_3	{d1, d2}/e f/a, g/h	V_3 V_5
V_4	c/-, a/b i/f, b/- {d1, d2}/j	V_1 V_2 V_4
V_5	g/h i/k	V_5 V_3

$$\begin{aligned}
 \min & F(Y_1, T)^+ + F(Y_2, T)^+ + F(Y_3, T)^+ + F(Y_4, T)^+ + F(Y_5, T)^+ \\
 & - F(Y_1, T)^- - F(Y_2, T)^- - F(Y_3, T)^- - F(Y_4, T)^- - F(Y_5, T)^- \\
 \text{s.t. } & F(S, X_1) = F(X_1, Y_1)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 F(S, X_2) &= F(X_2, Y_2) \\
 F(S, X_3) &= F(X_3, Y_3) + F(X_3, Y_5) \\
 F(S, X_4) &= F(X_4, Y_1) + F(X_4, Y_2) + F(X_4, Y_4) \\
 F(S, X_5) &= F(X_5, Y_3) + F(X_5, Y_5) \\
 F(Y_1, T)^+ + F(Y_1, T)^- &= F(X_1, Y_1) + F(X_4, Y_1) \\
 F(Y_2, T)^+ + F(Y_2, T)^- &= F(X_2, Y_2) + F(X_4, Y_2) \\
 F(Y_3, T)^+ + F(Y_3, T)^- &= F(X_3, Y_3) + F(X_5, Y_3) \\
 F(Y_4, T)^+ + F(Y_4, T)^- &= F(X_4, Y_4) \\
 F(Y_5, T)^+ + F(Y_5, T)^- &= F(X_3, Y_5) + F(X_5, Y_5) \\
 F(S, X_1) &\leq 6 & F(Y_1, T)^- &\leq 4 \\
 F(S, X_2) &\leq 3 & F(Y_2, T)^- &\leq 4 \\
 F(S, X_3) &\leq 2 & F(Y_3, T)^- &\leq 4 \\
 F(S, X_4) &\leq 4 & F(Y_4, T)^- &\leq 4 \\
 F(S, X_5) &\leq 5 & F(Y_5, T)^- &\leq 4
 \end{aligned}$$

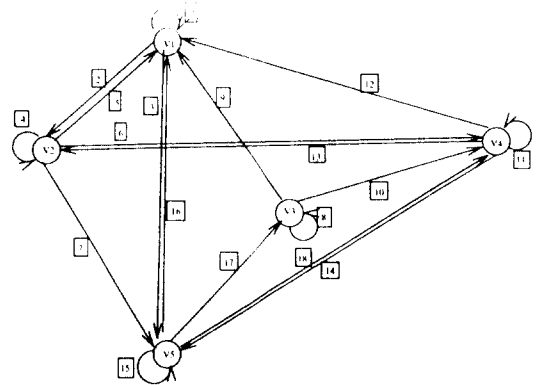
Solution: $f(X_1, Y_1) = 4, f(X_2, Y_2) = 3, f(X_3, Y_3) = 2, f(X_4, Y_4) = 4, f(X_5, Y_5) = 4, f(X_5, Y_3) = 1$

그림 4. $\sum_i |\zeta(V_i)|$ 를 최소화 하는 식과 값

Fig. 4 Equations and solution to minimize $\sum_i |\zeta(V_i)|$

Solution $f(X_1, Y_1) = 4$ 는 V_1 으로 들어오는 4개의 edge들에 $UIO_1^1 = a/b$ 를 할당하라는 것을 나타낸다.

그 결과 얻어진 test graph G' 는 그림 5에 나타내었다. 그림 5의 G' 는 $\zeta(V_1) = 2, \zeta(V_2) = -1$ 와 $\zeta(V_3) = -1$ 의 값을 가진다. 그림 5의 test graph를 symmetric하게 만들기 위하여 V_1 에서 V_2 로, V_1 에서 V_5 로, 그리고 V_5 에서 V_3 로 각각 하나씩의 edge를 추가하여야 한다. 그 결과 symmetric test graph로부터 얻어진 시험 순서는 표 4에 나타내었다. SUJO를 이용하여 구한 것보다 길이가 짧음을 알 수 있다.



- 1. {a/b, a/b}, {m/-, a/b}
- 2. {i/f, b/-}
- 3. {f/a, g/h}
- 4. {b/-, b/-}
- 5. {m/-, a/b}
- 6. {l/b, {d1, d2}/j}
- 7. {f/a, b/h}
- 8. {{d1, d2}/e, {d1, d2}/e}
- 9. {f/a, i/k}
- 10. {l/b, {d1, d2}/j}
- 11. {{d1, d2}/j, {d1, d2}/j}
- 12. {c/-, a/b}
- 13. {i/f, b/f}
- 14. {f/a, g/h}
- 15. {g/h, g/h}
- 16. {g/h, g/h}
- 17. {i/k, {d1, d2}/e}
- 18. {l/b, {d1, d2}/j}

그림 5. MUJO를 이용한 그림 1에 대한 G' .
Fig. 5 The graph G' for the graph shown in Fig.1(using MUJO)

표 4. MUJO를 이용하여 구한 그림 1에 대한 시험 순서
Table 4. An Conformance Test Sequence for the FSM Shown in Fig. 1(Using MUJO)

{a/b, a/b}, {m/-, a/b}, {i/f, b/-}, {m/-, a/b}, i/f, {b/-, b/-}, {l/b, {d1, d2}/j}, {{d1, d2}/j, {d1, d2}/j}, {i/f, b/-}, {f/a, g/h}, {g/h, g/h}, {b/c, a/b}, {f/a, g/h}, {l/b, {d1, d2}/j}, {f/a, g/h}, {i/k, {d1, d2}/e}, {{d1, d2}/e, {d1, d2}/e}, {f/a, i/k}, {l/b, {d1, d2}/j}, {c/-, a/b}, f/a, i/k, {b/c, a/b},
Total = 51 inputs

그림 5에 edge $(V_5, V_5; g/h, g/h)$ 대신 edge $(V_5, V_3; g/h, i/k)$ 를 사용하여 또 다른 test graph G'' 를 만들어 보자(G 의 $(V_5, V_5; g/h)$ edge에 UIO_5^5 대신 UIO_3^5 을

사용하여 얻을 수 있다). 이 G^* 은 $\zeta(V_1)=2, \zeta(V_2)=-1$ 와 $\zeta(V_3)=-1$ 의 값을 갖는다. 즉, G^* 의 $\sum_i |\zeta(V_i)|$ 의 값은 G^* 의 것과 같다. 그러나 test graph G^* 를 symmetric하게 만들기 위해서는 V_1 에서 V_2 로, 그리고 V_1 에서 V_3 로 각각 하나씩, 총 2개의 edge만을 추가한다. 따라서 test graph G^* 를 symmetric하게 만들기 위하여 추가되는 edge의 갯수가 G^* 보다 작음을 알 수 있다.

III. MUSP를 이용한 Test Sequence 생성

앞 장에서 단지 $\sum_i |\zeta(V_i)|$ 를 최소로 하는 것은 시험의 길이를 최소로 하지 않을 수도 있다는 것을 보였다. Index variation 양만을 고려하고 test graph를 symmetric하게 만들기 위하여 첨가되어야 할 edge의 갯수를 고려하지 않았기 때문이다.

$d_{in}^E(V_i) - \sum_i f(X_i, Y_i) > 0$ 인 상태 V_i 와 $d_{out}^E(V_j) - \sum_i f(X_i, Y_i) > 0$ 인 상태 V_j 이 있다고 하자. 상태 V_i 는 $d_{in}^E(V_i) - \sum_i f(X_i, Y_i)$ 개의 outgoing edge를 필요로 하고 상태 V_j 는 $d_{out}^E(V_j) - \sum_i f(X_i, Y_i)$ 개의 incoming edge를 필요로 한다. 이 사실로부터 G^* 에 몇 개의 edge $(V_i, V_j) \in E$ 를 추가하여 symmetric한 graph G^* 를 구할 수 있다. 이때 edge (V_i, V_j) 가 E 에 속하지 않으면 V_i 에서 V_j 로 가는 shorest path를 형성하는 edge들을 이용하여 symmetric한 graph G^* 를 구할 수 있다. 이 사실로부터 앞 장의 G_M 을 다음과 같이 Graph $G_N=(V_N, F_N)$ 으로 바꿀 수 있다. 여기서

$$V_N \equiv \{S, T\} \cup V_X \cup V_Y,$$

$$E_N \equiv E_S \cup E_T \cup E^A \cup E_{SH},$$

$E_{SH} = \{(Y_i, Y_j); Y_i, Y_j \in V_Y\}$ 이며 E_{SH} 에 속하는 edge들의 비용은 i 에서 j 로의 shorest path의 길이인 α_{ij} 이고 무한 용량을 가진다. E_T 에 속하는 edge의 비용은 0이고, 용량은 $d_{out}^E(V_j)$ 를 가진다. G_N 의 flow F 는 (2)번 수식을

$$\sum_i F(Y_j, Y_i) + F(Y_j, T) = \sum_i F(X_i, Y_i) + \sum_i F(Y_i, Y_j) \quad (5)$$

과 같이 바꾸고 비용을 $\sum_i \sum_j \alpha_{ij} F(Y_i, Y_j)$ 과 같이 바꾸는 것을 제외하고 G_M 의 것과 동일하다.

Theorem 1: f 를 G_N 상의 minimum-cost maximum flow라 하고 G^* 를 f 로부터 만들자. 그러면 test graph를 symmetric하게 만들기 위해 새로이 첨가되어야 하는 edge의 갯수가 최소가 된다.

Proof: 각 X_i 에서 몇 개의 Y_j 로 무한 용량을 갖는 edge가 있으므로 $f(S, X_i) = d_{in}^E(V_i)$ 가 성립된다. 또한 $\sum_i d_{in}^E(V_i) = \sum_j d_{out}^E(V_j)$ 와 각 Y_j 에서 모든 Y_j 로 무한 용량을 갖는 edge가 있으므로 $f(Y_j, T) = d_{out}^E(V_j)$ 가 성립된다.

$d_{out}^E(V_j) = d_{out}^E(V_j)$ 그리고 $d_{in}^E(V_i) = \sum_j F(X_i, Y_j)$ 의 사실로부터 (5)번식은 $d_{out}^E(V_i) + \sum_j F(Y_i, Y_j) = d_{in}^E(V_i) + \sum_j F(Y_j, Y_i)$ 로 표현될 수 있다. 이것은 $\sum_j F(Y_i, Y_j)$ 와 $\sum_k F(Y_k, Y_i)$ 은 각각 test graph를 symmetric하게 만들기 위하여 V_i 에 새로이 첨가되는 incoming, outgoing edge의 갯수를 나타낸다. $F(Y_i, Y_j)$ 은 첨가되어야 하는 V_i 에서 V_j 로의 path의 갯수를 나타낸다. 그러므로 $\sum_i \sum_j \alpha_{ij} F(Y_i, Y_j)$ 는 test graph를 symmetric하게 만들기 위해 첨가되는 edge의 총 갯수를 나타낸다. □

그림 1에 주어진 FSM에 MUSP를 이용하여 시험 순서를 구해보자. 그림 6은 G_N 을 나타내며 그림 7로부터 G_N 의 minimum-cost maximum flow f 를 구할 수 있다. 이 flow f 는 FSM graph로부터 symmetric test graph를 직접 유도한다(G_M 의 flow는 단지 test graph만을 유도한다). 그 결과시험 순서는 표 5에 나타내었으며 표 4보다 2% 줄었음을 알 수 있다.

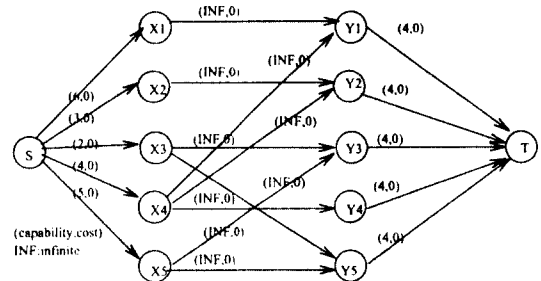


그림 6. 그림 1에 대한 G_N ; Edges $(Y_i, Y_j) \in E_{SH}$ 는 나타내지 않음.

Fig. 6 The graph G_N for the FSM of Fig.1; Edges $(Y_i, Y_j) \in E_{SH}$ are not shown. Those edges have infinite capacity and cost α_{ij} .

$$\begin{aligned}
 & \min F(Y_1, Y_1) + F(Y_1, Y_2) + 2F(Y_1, Y_3) + 2F(Y_1, Y_4) + F(Y_1, Y_5) + F(Y_2, Y_1) \\
 & \quad + F(Y_2, Y_2) + 2F(Y_2, Y_3) + F(Y_2, Y_4) + F(Y_2, Y_5) + F(Y_3, Y_1) + 2F(Y_3, Y_2) \\
 & \quad + F(Y_3, Y_3) + F(Y_3, Y_4) + F(Y_3, Y_5) + F(Y_4, Y_1) + F(Y_4, Y_2) + 2F(Y_4, Y_3) \\
 & \quad + F(Y_4, Y_4) + F(Y_4, Y_5) + F(Y_5, Y_1) + 2F(Y_5, Y_2) + F(Y_5, Y_3) + F(Y_5, Y_4) \\
 & \quad + F(Y_5, Y_5) \\
 \text{s.t. } & F(S, X_1) = F(X_1, Y_1). \\
 & F(S, X_2) = F(X_2, Y_2). \\
 & F(S, X_3) = F(X_3, Y_3) + F(X_3, Y_5). \\
 & F(S, X_4) = F(X_4, Y_1) + F(X_4, X_2) + F(X_4, Y_5). \\
 & F(S, X_5) = F(X_5, Y_3) + F(X_5, Y_5). \\
 & F(Y_1, T) + F(Y_1, Y_1) + F(Y_1, Y_2) + F(Y_1, Y_3) + F(Y_1, Y_4) + F(Y_1, Y_5) \\
 & \quad = F(X_1, Y_1) + F(Y_1, Y_1) + F(Y_2, Y_1) + F(Y_3, Y_1) + F(Y_4, Y_1) + F(Y_5, Y_1). \\
 & F(Y_2, T) + F(Y_2, Y_1) + F(Y_2, Y_2) + F(Y_2, Y_3) + F(Y_2, Y_4) + F(Y_2, Y_5) \\
 & \quad = F(X_2, Y_2) + F(X_4, Y_2) + F(Y_1, Y_2) + F(Y_2, Y_2) + F(Y_3, Y_2) + F(Y_4, Y_2) + F(Y_5, Y_2). \\
 & F(Y_3, T) + F(Y_3, Y_1) + F(Y_3, Y_2) + F(Y_3, Y_3) + F(Y_3, Y_4) + F(Y_3, Y_5) \\
 & \quad = F(X_3, Y_3) + F(X_3, Y_5) + F(Y_1, Y_3) + F(Y_2, Y_3) + F(Y_3, Y_3) + F(Y_4, Y_3) + F(Y_5, Y_3). \\
 & F(Y_4, T) + F(Y_4, Y_1) + F(Y_4, Y_2) + F(Y_4, Y_3) + F(Y_4, Y_4) + F(Y_4, Y_5) \\
 & \quad = F(X_4, Y_4) + F(Y_1, Y_4) + F(Y_2, Y_4) + F(Y_3, Y_4) + F(Y_4, Y_4) + F(Y_5, Y_4). \\
 & F(Y_5, T) + F(Y_5, Y_1) + F(Y_5, Y_2) + F(Y_5, Y_3) + F(Y_5, Y_4) + F(Y_5, Y_5) \\
 & \quad = F(X_5, Y_3) + F(X_5, Y_5) + F(Y_1, Y_5) + F(Y_2, Y_5) + F(Y_3, Y_5) + F(Y_4, Y_5) + F(Y_5, Y_5). \\
 & F(S, X_1) \leq 6 \qquad F(Y_1, T) \leq 4 \\
 & F(S, X_2) \leq 3 \qquad F(Y_2, T) \leq 4 \\
 & F(S, X_3) \leq 2 \qquad F(Y_3, T) \leq 4 \\
 & F(S, X_4) \leq 4 \qquad F(Y_4, T) \leq 4 \\
 & F(S, X_5) \leq 5 \qquad F(Y_5, T) \leq 4 \\
 \text{sol: } & f(X_1, Y_1) = 4, f(X_2, Y_2) = 3, f(X_3, Y_3) = 2, f(X_4, Y_4) = 4, f(X_5, Y_3) = 2, \\
 & f(X_5, Y_5) = 3, f(Y_1, Y_2) = 1, f(Y_1, Y_5) = 1,
 \end{aligned}$$

그림 7. 그림 1로 부터 G^* 를 찾기 위한 식과 값.
Fig. 7 Equations and Solution to find a G^* from the G

표 5. MUSP를 이용하여 구한 그림 1에 대한 시험 순서
Table 5. An Conformance Test Sequence for the FSM Shown in Fig. 1(Using MUSP)

{a/b, a/b}, {m/-, a/b}, {i/f, b/-}, {m/-, a/b}, i/f,
{b/-, b/-}, {1/b, {d1, d2}/j}, {{d1, d2}/j, {d1, d2}/j},
{i/f, b/-}, {f/a, g/h}, {b/c, a/b}, {f/a, g/h},
{1/b, {d1, d2}/j}, {f/a, g/h}, {i/k, {d1, d2}/c},
{{d1, d2}/e, {d1, d2}/e}, {f/a, i/k}, {1/b, {d1, d2}/j},
{c/-, a/b}, f/a, {g/h, i/k}, {b/c, a/b},
Total = 50 inputs

표 6은 랜덤하게 생성된 FSM에 MUSP를 이용하여 시험 순서를 구한 시뮬레이션 결과를 보여주고 있다. MUIO를 이용한 것보다 1.0~9.3%의 시험 길이가

줄었음을 알 수 있다.

표 6. MUIO와 MUSP를 이용하여 생성된 시험 순서의 길이
Table 6. The Length of Test Sequence Generated using MUIO and MUSP

FSM	V	E	I	O	E_c	MUIO	MUSP
FSM.1	7	20	5	5	47	76	70
FSM.2	10	43	10	10	86	105	102
FSM.3	10	49	10	10	103	114	112
FSM.4	10	38	10	5	80	105	94
FSM.5	10	43	5	5	97	129	117

IV. 결론

최근에 프로토콜 적합성 시험을 위하여 시험 순서

