

論文95-32B-12-2

3值 論理回路의 故障分析 및 檢出

(Fault Analysis and Detection of Ternary Logic)

金鍾五*, 金榮建**, 金興壽***

(Jong O Kim, Young Gun Kim, and Heung Soo Kim)

요 약

Chrestenson 함수의 스펙트럴계수를 이용하여 3치 논리회로에서의 고장분석을 통한 고장검출 조건을 제안하였다. 또한 3치 논리회로에 있어서 단일입력, 다중입력, 내부선의 stuck-at 고장 및 Min/Max bridging 고장에 대한 검출조건을 제안하였고, 예를 통해 입증하였다. 이 같은 스펙트럴 계수에 의한 고장검출은 결국 테스트 벡터를 사용하지 않기 때문에, 벡터 및 출력 데이터의 저장을 위한 메모리를 최소화할 수 있고, 벡터생성을 위한 연산의 복잡도를 줄일 수 있다.

Abstract

A fault detecting method of ternary logic is proposed by using the spectral coefficients of the Chrestenson function. Fault detecting conditions are derived for a stuck-at fault in case of single input, multiple inputs and internal lines in the ternary logic. The detecting conditions for min/max bridging faults are also considered. When using this fault analysis method, it is possible to detect faults without the test vector and minimize high volume memory for storing the vector and response data. Thus, the computational complexity for the test vector can be decreased.

I. 서 론

조합회로의 고장 테스트에서 가장 널리 사용되는 방법은, 고장의 종류에 따라 회로의 동작을 검증하기 위한 테스트 벡터를 이용하는 방법이다. 이 방법은 각각의 테스트 벡터에 대해서 정상회로의 출력 데이터와 테스트 대상 회로(CUT)에서 얻은 데이터를 저장하기

위한 메모리가 요구된다. 또한 각 고장을 검출하기 위한 적절한 테스트 벡터의 생성에 많은 계산시간을 필요로 한다. 특히 이 같은 메모리와 계산시간은 회로의 크기 및 논리단계의 수가 증가함에 따라 지수적으로 커지게 된다. 따라서 테스트 가능한 설계나 BIST (Built-In Self Test) 설계시 장해요소가 된다. 이 같은 문제를 최소화하는 방법으로 여러 종류의 데이터 압축방법에 의한 테스트 방법이 연구되고 있다. 그중 하나의 방법으로 CUT에 모든 입력조합을 인가하고, 그 출력응답을 압축하는 철저검사(Exhaustive Testing) 방법이 있다. 이 경우 입력 발생기는 간단한 카운터 형태로 구성되기 때문에 테스트 벡터를 위한 메모리가 필요치 않고, 테스트 벡터 생성을 위한 복잡한 단계를 피할 수 있다. 단지, 각 고장모델에 따른 특정 스펙트럴 계수의 값을 분석하므로써, CUT의 고장여부

* 正會員, 東洋工業專門大學 電子科
(Dept. of Elec. Eng., Dongyang Tech. College)

** 正會員, 安山專門大學 電算情報處理科
(Dept. of Computer Inform. Pro., Ansan Tech. College)

*** 正會員, 仁荷大學校 電子工學科
(Dept. of Electronic Eng., Inha University)

接受日字: 1995年3月6日, 수정완료일: 1995年11月27日

를 판단할 수 있게 된다. 이 같은 스펙트럴 방법에 한 테스트 방법은 테스트 벡터가 필요치 않고, 하드웨어의 추가가 많지 않기 때문에, BIST의 설계에 용이하여 이에 대한 연구가 많이 진행되고 있다. Tzidon^[11]은 단일 s-a 고장의 검출을 위해 스펙트럴 계수를 사용하였고, Savir^[12]는 0차 스펙트럴 계수를 검사하여 회로의 고장유무를 판단하는 syndrome을 이용한 테스트 방법을 제시하였다. 또한 Miller와 Muzio^[13,4,5,6,9]는 1차 이상의 스펙트럴 계수의 검사에 의해서 고장검출에 관한 연구를 하였다. 앞선 연구는 2진회로의 스펙트럴 방법에 대한 것이기 때문에 Rademacher/Walsh^[16] 함수에 대한 스펙트럴 분석을 이용하였다.

최근 다치논리회로에 대한 연구가 활발해짐에 따라 고장검출에 대한 관심도 아울러 커지고 있다^[10-15]. 현재는 다치논리회로 구현을 위한 전용 소자가 없는 관계로 주요 고장검출 연구는 게이트 레벨에서 이루어지고 있다. 다치논리회로의 고장검출에 대한 주요 연구를 살펴보면 다음과 같다. Ajabnoor와 Abd-El barr^[10]는 Logic Difference 방법을 이용하여 내부선 및 주입력에서의 stuck-at 형태의 고장검출을 위한 테스트 벡터 구성에 관한 연구를 제안하였는데, 이 방법은 2진에서 발표된 Boolean Difference 방법을 확장시킨 것이다. Lo와 Lee^[11]는 2진의 K-map 방법과 Path-sensitization 방법을 확장하여, 단일 및 내부선의 stuck-at 고장에 대한 검출방법을 제시하였다. 또한 Lu와 Lee^[12]는 Boolean Difference를 확장한, Partial M-difference를 정의하여 입력 및 내부선의 고장모델에 대한 테스트 벡터 방법을 제안하였다. Guima와 Tapia^[13]는 Direct 및 Partial Derivatives를 정의하여 stuck-at 형태의 고장검출방법을 제안하였고, Whitney와 Muzio^[14]는 Decisive difference 및 Partial difference를 이용하여 stuck-at 형태의 내부선 및 다중고장에 대한 검출방법에 관한 연구를 하였다. 또한 Damarla^[15]는 Reed-Muller 계수를 이용한 검출방법을 제안하여 stuck-at 및 bridging 고장에 대한 검출방법에 대한 연구를 수행하였으나, 이 방법 역시 특정 고장을 위한 테스트 벡터 구성을 하여야 한다. 이상과 같이 다치논리회로의 고장검출에 관한 연구는 대부분 2진에서 적용된 Boolean difference나 Path sensitization 등의 방법들을 다치논리회로의 고장검출을 위해 확장한 것으로서, 테스트 벡터 방법이기 때문에 벡터의 생성을 위한 처리가 요

구되고, 저장을 위한 메모리가 필요하여 BIST용 다치논리회로의 설계에 부적절한 문제점을 안고 있다.

이 같은 문제점을 해결하기 위해서, 본 논문에서는 3차 논리회로에 대한 고장분석을 위해 Chrestenson 함수^[6,7,8]의 스펙트럴 계수를 이용하여, 3차 논리회로에서의 단일입력 s-a 고장, 다중입력 s-a 고장, 내부선의 s-a 고장에 대한 검출조건을 제안하였다. 또한, 3차 논리회로의 구성시 기본적인 모듈인 Min/Max 회로의 고장모델을 정의하고 스펙트럴 계수에 의한 검출조건에 대해서도 아울러 제시하였다. 본 논문의 구성은 II장에서 3차 논리회로에 대한 Chrestenson 함수, Hadarmard 변환에 의한 스펙트럴 계수의 특성 및 부분함수의 스펙트럴 계수에 관해 살펴보았고, III장에서는 단일입력 s-a 고장, 다중입력 s-a 고장, 내부선의 s-a 고장에 대한 syndrome 및 스펙트럴 계수에 의한 고장검출에 대해 분석하였으며, Min/Max bridging 고장에 대한 고장모델과 고장 검출조건을 제시하였고, IV장은 결론 순으로 되어있다.

II. 3차 논리함수의 스펙트럼

3차 논리(Ternary Logic) 함수 f 는 사상(mapping) $f : L^n \rightarrow L$ 로 정의된다. 여기서 L 은 3차 논리 시스템인 경우의 논리값의 유한집합으로 $L = \{ 0, 1, 2 \}$ 이다. 3차 논리함수의 모든 입력원소의 집합을 $x = (x_1, x_2, \dots, x_{n-1}, x_n)$ 이라 하면 3차 논리 함수는 $f(x_1, x_2, \dots, x_{n-1}, x_n)$ 으로 표기한다. v 의 3차 확장을 $(v_1, v_2, \dots, v_{n-1}, v_n)$ 이라 하면, $x_i = v_i (1 \leq i \leq n)$ 에 대한 $f(v)$ 의 스펙트럼 $s_0, s_1, \dots, s_q (q = 3^n - 1)$ 는 다음 식으로 정의된다^[6,8].

$$s_w = \sum_{v=0}^q t_w(v)y(v) \tag{1}$$

여기서

$$y(v) = a^{f(v)},$$

$$t_w(v) = a^{ch(w,v)},$$

$$a = \exp(-j\frac{2\pi}{3}), \quad j = \sqrt{-1}$$

$$ch(w,v) = \sum_{i=1}^n w_i v_i,$$

$$w = \sum_{i=1}^n w_i 3^{i-1}, \quad v = \sum_{i=1}^n v_i 3^{i-1}$$

식 (1)에서 $t_w(v)$ 는 Chrestenson 함수가 된다. 식

(1)로 부터 $y(w)$ 를 구하면 다음과 같다.

$$y(w) = \frac{1}{3^n} \sum_{v=0}^{\beta} t_w(v) s_v \quad (2)$$

식 (1)과 식 (2)를 행렬로 표현하면, v 번째 원소가 $y(v)$ 인 열 벡터 Y 와 w 번째 원소가 s_w 인 열 벡터 S 가 된다. T^n 행렬은 w 번째 행과 v 번째 열의 원소가 $t_w(v)$ 인 $3^n \times 3^n$ 인 행렬이 된다. 식 (1)과 식 (2)의 행렬표현은 다음과 같다.

$$[\overline{T}_3^n] [Y] = [S] \quad (3)$$

$$[Y] = \frac{1}{3^n} [T_3^n] [S] \quad (4)$$

$[T^n]$ 행렬은 직교, 대칭이기 때문에 $[T^n]^{-1} = [T^n]$. $[T^n]^{-1} = \frac{1}{3^n} [\overline{T}^n]$ 이 된다. 단, \overline{T}^n 은 T^n 의 공액복소수 행렬이다.

주어진 함수 $f(x)$ 를 Shannon 방식으로 분해할 경우, 함수 $f(x)$ 의 스펙트럼과 부분함수의 스펙트럼 사이에는 다음과 같은 관계를 갖는다. 이때 S 와 Y 는 3^{n-m} 개의 같은 크기의 부벡터(subvector)로 분해된다.

$$f_u(x_1, x_2, \dots, x_m) = f(x_1, x_2, \dots, x_m, u_1, u_2, \dots, u_{n-m}) \quad (5)$$

여기서, $0 \leq u \leq 3^{n-m} - 1$, $u = \sum_{i=1}^{n-m} u_i 3^{i-1}$ 이다.

$$S = \begin{bmatrix} S^0 \\ S^1 \\ S^2 \\ \vdots \\ S^\beta \end{bmatrix}, Y = \begin{bmatrix} Y_0 \\ Y_1 \\ Y_2 \\ \vdots \\ Y_\beta \end{bmatrix}, \beta = 3^{n-m} - 1 \quad (6)$$

$$[S^0 \ S^1 \ \dots \ S^\beta] = [S_0 \ S_1 \ \dots \ S_\beta] \overline{T}_{3^{n-m}} \quad (7)$$

$$[S_0 \ S_1 \ \dots \ S_\beta] = \frac{1}{3^{n-m}} [S^0 \ S^1 \ \dots \ S^\beta] T_{3^{n-m}} \quad (8)$$

함수 f 의 스펙트럼 S 의 i 번째 부벡터 S^i 와 부분함수 f_i 의 스펙트럼 S_i 는 각각 식 (9)와 식 (10)과 같이 유도된다.

$$S^i = [S_0 \ S_1 \ \dots \ S_\beta] \overline{T}_{3^{n-m}} \quad (9)$$

$$S_i = \left(\frac{1}{3^{n-m}} \right) [S^0 \ S^1 \ \dots \ S^\beta] T_{3^{n-m}} \quad (10)$$

따라서, 부벡터 S^i 의 j 번째 원소 s_j^i 와 부분함수의 스펙트럼 S_i 의 j 번째 원소 s_{ij} 는 각각 다음 식과 같게 된다.

$$s_j^i = \sum_{k=0}^{\beta} \overline{t_{3^{n-m}}^{k,i}} s_{kj} \quad (11)$$

$$s_{ij} = \left(\frac{1}{3^{n-m}} \right) \sum_{k=0}^{\beta} t_{ki}^{n-m} s_j^k \quad (12)$$

여기서, $\overline{T}_{3^{n-m}}^{k,i}$ 과 $T_{3^{n-m}}^{k,i}$ 은 각각 \overline{T}_3^{n-m} 과 T_3^{n-m} 행렬의 i 열이다.

단, $0 \leq i, \beta \leq 3^{n-m} - 1, 0 \leq j \leq 3^m - 1$ 이다.

다치 논리 대수는 집합 $Q = \{0, 1, 2, \dots, (p-1)\}$ 의 원소이고, $0 < 1 < 2 \dots < m-1$ 의 관계를 갖는 기하학적인 시스템으로서, 다음과 같은 이항 연산자와 단항 연산자로 정의된다. 변수 x_1, x_2, \dots, x_n 은 Q 의 원소이다^[9].

(i) max 연산자 (" + " 로 표기)

$$x_1 + x_2 = \max(x_1, x_2) = \begin{cases} x_1 & \text{if } x_1 \geq x_2 \\ x_2 & \text{otherwise} \end{cases}$$

(ii) min 연산자 (" . " 로 표기)

$$x_1 \cdot x_2 = \min(x_1, x_2) = \begin{cases} x_1 & \text{if } x_1 \leq x_2 \\ x_2 & \text{otherwise} \end{cases}$$

(iii) literal 연산자 (" x_i " 로 표기)

$$x_i^j = \begin{cases} (b-1) & \text{if } x_i = j \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

(iv) complement 연산자 (" \overline{x}_i " 로 표기) .

$$\overline{x}_i = (b-1) - x_i$$

III. 3치 논리회로의 고장분석

함수 $f(x)$ 를 구현하는 3치 논리회로에서, 영구적인 고장으로 인해 $f(x)$ 와 다른 고장함수 $f'(x)$ 로 동작되는 장애(failure)현상이 함수고장(functional fault)이다. 고장검출 문제는 주어진 회로가 원래의 함수 $f(x)$ 를 실현하고, $f'(x)$ 로 동작되지 않는다는 것을 검증하기 위한 효율적이고, 경제적인 테스트를 수행하는 것이다. 고장 모델이란 물리적인 회로장애로 인한 함수의 동작을 함축적으로 표현한 것이다. 3치 논리회로에서의 $s-a-i$ ($0 \leq i \leq 2$) 고장이란 어떤 선이 0에서 2사이의 논리값으로 고정되어 나타나는 고장 모델을 말한다. 3치 k 선으로 구성된 회로에서 단일 선의 고장은 $3k$ 경우가 존재하고, 다중 선의 $s-a-i$ 고장인 경우는 $4^k - 1$ 의 고장이 발생할 수 있다.

정의 1.

n변수 3치 논리회로에서 다음 식을 그 회로의 syndrome으로 정의한다.

$$s_0 = \sum_{v=0}^2 \bar{t}_0(v)y(v) = \sum_{v=0}^2 y(v) = \sum_{v=0}^2 a^{f(v)} \quad (13)$$

여기서 $q = 3^n - 1$ 이다.

이 syndrome은 함수적인 특성을 갖기 때문에, 어떤 함수에 대한 syndrome은 유일하게 존재한다. 따라서, 동일 함수에 대해 각기 다른 구현을 하더라도 그 syndrome은 같은 값을 갖게 된다.

앞으로 x_k 입력이 어떤 값 i ($0 \leq i \leq 2$)에 stuck-at 된 고장을 x_k/i 로 표기하기로 한다.

1. 단일입력 고장

정리 1.

3치 논리회로 N의 주입력 (x_1, x_2, \dots, x_n) 중에서, 어느 하나의 입력이 $s-a-i$ ($0 \leq i \leq 2$) 고장 발생시 그 고장은 다음 조건을 만족하는 경우 syndrome 테스트가 가능하다.

$$\sum_{k=1}^2 t_{ki} s_0^k \neq 0 \quad (14)$$

(증명)

x_n 의 고장에 대해 증명하면, 다른 입력의 고장에 대해서는 변수치환에 의해 같은 방법으로 증명된다. x_n/i 인 경우의 함수는 $f(x_1, x_2, \dots, x_{n-1}, i)$ 로 표시한다. 이 경우 syndrome 테스트 가능하기 위해서는 함수 f_i 의 0차 스펙트럼 계수가 정상회로인 경우의 스펙트럼 s_0 와 다른 경우에만 가능하다. x_n/i 인 경우 함수의 출력 벡터 Y 는 다음과 같다.

$$Y_0^* = Y_1^* = Y_2^* = Y_i \quad (15)$$

$$S_0^* = S_1^* = S_2^* = S_i \quad (16)$$

식 (9), 식 (11), 식 (12)로 부터, 단일고장은 $n-m=1$ 인 경우이므로

$$S^{0*} = 3S_i, S^{a*} = 0, 1 \leq a \leq 2 \quad (17)$$

가 된다. 이때의 syndrome s_0^* 는 다음과 같다.

$$s_0^* = 3s_{i0} = 3 \cdot \left(\frac{1}{3}\right) \sum_{k=0}^2 t_{ki} s_0^k = s_0^* + \sum_{k=1}^2 t_{ki} s_0^k \quad (18)$$

syndrome 테스트 조건은 $s_0 \neq s_0^*$ 이고, $t_{0i}^1 = 1, s_0 = s_0^*$ 이므로,

$$\sum_{k=1}^2 t_{ki} s_0^k \neq 0 \quad \text{Q.E.D.}$$

정리 2.

3치 논리 회로 N의 주입력 (x_1, x_2, \dots, x_n) 중에서, 어느 하나의 입력이 $s-a-i$ ($0 \leq i \leq 2$) 고장 발생시, 그 고장은 다음 조건을 만족하는 경우 s_j^0 -testable 하다.

$$\sum_{k=1}^2 t_{ki} s_j^k \neq 0 \quad (19)$$

(증명)

식 (12)와 정리 1.의 증명으로 부터, x_n/i 인 경우 스펙트럼은 $S^{0*} = \rho S_i$ 이고, s_j^{0*} 는

$$s_j^{0*} = 3s_{ji} = \sum_{k=0}^2 t_{ki} s_j^k = s_j^0 + \sum_{k=1}^2 t_{ki} s_j^k \text{가 된다.}$$

따라서, $s_j^0 \neq s_j^{0*}$ 을 만족하기 위해서는 $\sum_{k=1}^2 t_{ki} s_j^k \neq 0$ 이어야 한다. Q.E.D.

정리 3.

3치 논리 회로 N의 주입력 (x_1, x_2, \dots, x_n) 에서, 어느 하나의 입력이 $s-a-i$ ($0 \leq i \leq 2$) 고장 발생시, 다음 조건을 만족하는 경우 그 고장은 s_j^a -testable 하다.

$$s_j^a \neq 0, 1 \leq a \leq 2 \text{ 단, } (1 \leq a \leq 2) \quad (20)$$

(증명)

x_n/i 고장시 스펙트럼은 식 (17)로 부터 $S^{0*} \neq 0, S^{a*} = 0, 1 \leq a \leq 2$ 가 된다. 즉, $S^{a*} = 0$ 이 되므로, 그 원소 스펙트럼도 $s_j^{a*} = 0, 1 \leq a \leq 2, 0 \leq j \leq 3^n - 1$ 이 된다. 따라서, 정상 회로의 스펙트럼 s_j^a 가 0이 아니면, s_j^a -testable 하다. Q.E.D.

(예제)

$n=3$ 인 그림 1.과 같은 3치 함수 $f(x) = x_1 + x_2 x_3$ 의 단일 입력 고장에 대해 살펴보면 다음과 같다.

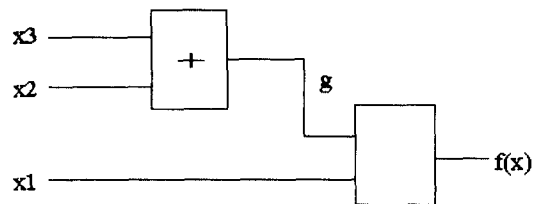


그림 1. 3변수 3치 회로
Fig. 1. Three variable ternary logic.

식 (1)과 함수 f(x)로 부터,

$$T_3^1 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix}, \quad \overline{T_3^1} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix}$$

$$T_3^2 = \begin{bmatrix} T_3^1 & T_3^1 & T_3^1 \\ T_3^1 & aT_3^1 & a^2T_3^1 \\ T_3^1 & a^2T_3^1 & aT_3^1 \end{bmatrix}, \quad T_3^3 = \begin{bmatrix} T_3^2 & T_3^2 & T_3^2 \\ T_3^2 & aT_3^2 & a^2T_3^2 \\ T_3^2 & a^2T_3^2 & aT_3^2 \end{bmatrix}$$

$$S = [S^0 \ S^1 \ S^2]', \quad Y = [Y_0 \ Y_1 \ Y_2]'$$

$$S = \overline{T_3^3} Y, \quad S_0 = \overline{T_3^3} Y_0, \quad S_1 = \overline{T_3^3} Y_1, \quad S_2 = \overline{T_3^3} Y_2$$

$$Y = [1, a, a^2, 1, a, a^2, 1, a, a^2, 1, a, a^2, a, a, a^2, a, a, a^2, 1, a, a^2, a, a, a^2, a^2, a^2, a^2]'$$

이고, 정상 회로의 스펙트럼은 다음과 같다.

$$S^0 = [6a+6a^2, 21+3a, 6a+3a^2, 6, 6+3a^2, 3, 0, 3, 3+3a^2]'$$

$$S^1 = [6, 6+3a^2, 3, 6a+3a^2, 3a, 3a+3a^2, 3a^2, 3a+3a^2, 0]'$$

$$S^2 = [0, 3, 3+3a^2, 3a^2, 3a+3a^2, 0, 3+3a, 0, 3a]'$$

(i) x_3 에 stuck at 고장이 발생된 경우

① 식 (14)의 syndrome 테스트 조건으로부터,

$$x_3/0 \text{인 경우} : \sum_{k=1}^2 t_{k0} s_0^k = t_{10} s_0^1 + t_{20} s_0^2 = 6 \neq 0, \text{ 따라서 syndrome 테스트 가능.}$$

$$x_3/1 \text{인 경우} : \sum_{k=1}^2 t_{k1} s_0^k = t_{11} s_0^1 + t_{21} s_0^2 = 6a \neq 0, \text{ syndrome 테스트 가능.}$$

$$x_3/2 \text{인 경우} : \sum_{k=1}^2 t_{k2} s_0^k = t_{12} s_0^1 + t_{22} s_0^2 = 6a^2 \neq 0, \text{ syndrome 테스트 가능.}$$

② 정리 2.로 부터 s_j^i -testable 조건은, $\sum_{k=1}^2 t_{ki} s_j^k \neq 0$ 이 되기 때문에 x_3/i 에 대해 살펴보면 다음과 같다.

	s_0^0	s_1^0	s_2^0	s_3^0	s_4^0	s_5^0	s_6^0	s_7^0	s_8^0
$x_3/0$	✓	✓	✓	✓	✓	✓	X	✓	✓
$x_3/1$	✓	✓	✓	✓	X	✓	✓	✓	✓
$x_3/2$	✓	✓	X	✓	✓	✓	✓	✓	✓

단, ✓ 는 s_j^i -testable 이고, X 는 s_j^i not testable 이다.

③ s_j^i -testable은 식 (20)에 의해 다음과 같다.

$$s_0^1, s_1^1, s_2^1, s_3^1, s_4^1, s_5^1, s_6^1, s_7^1$$

$$s_1^2, s_2^2, s_3^2, s_4^2, s_6^2, s_8^2$$

(ii) x_2 에 stuck at 고장이 발생된 경우

x_2 에 대해서, 스펙트럴 계수를 재배열하면, 다음과 같다.

$$S^0 = [6a+6a^2, 21+3a, 6a+3a^2, 6, 6+3a^2, 3, 0, 3, 3+3a^2]'$$

$$S^1 = [6, 6+3a^2, 3, 6a+3a^2, 3a, 3a+3a^2, 3a^2, 3a+3a^2, 0]'$$

$$S^2 = [0, 3, 3+3a^2, 3a^2, 3a+3a^2, 0, 3+3a, 0, 3a]'$$

이 경우는 x_3 에 대해서 정리한 것과 같기 때문에, syndrome, s_j^i , s_j^i -testable은 x_3/i 인 경우와 동일하다.

(iii) x_1 에 stuck at 고장이 발생된 경우

x_1 에 대해서, 스펙트럴 계수를 재배열하면 다음과 같다.

$$S^0 = [6a+6a^2, 6, 0, 6, 6+3a^2, 3a^2, 0, 3a^2, 3+3a]'$$

$$S^1 = [21+3a, 6+3a^2, 3, 6a+3a^2, 3a, 3a+3a^2, 3, 3a+3a^2, 0]'$$

$$S^2 = [6a+3a^2, 3, 3+3a^2, 3, 3a+3a^2, 0, 3+3a^2, 0, 3a]'$$

① 식 (14)의 syndrome 테스트 조건으로부터,

$$x_1/0 \text{인 경우} : \sum_{k=1}^2 t_{k0} s_0^k = t_{10} s_0^1 + t_{20} s_0^2 = 17 + 6a \neq 0, \text{ 따라서 syndrome 테스트 가능.}$$

$$x_1/1 \text{인 경우} : \sum_{k=1}^2 t_{k1} s_0^k = t_{11} s_0^1 + t_{21} s_0^2 = a(21+3a)+a^2(6a+3a^2)=3+21a \neq 0, \text{ syndrome 테스트 가능.}$$

$$x_1/2 \text{인 경우} : \sum_{k=1}^2 t_{k2} s_0^k = t_{12} s_0^1 + t_{22} s_0^2 = a^2(21+3a)+a(6a+3a^2)=6+27a^2 \neq 0, \text{ syndrome 테스트 가능.}$$

② 식 (19)의 s_j^i -testable 조건은, $\sum_{k=1}^2 t_{ki} s_j^k \neq 0$ 이 되기 때문에 x_1/i 에 대해 살펴보면 다음과 같다.

	s_0^0	s_1^0	s_2^0	s_3^0	s_4^0	s_5^0	s_6^0	s_7^0	s_8^0
$x_1/0$	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
$x_1/1$	✓	✓	✓	✓	X	✓	✓	✓	✓
$x_1/2$	✓	✓	X	✓	✓	✓	✓	✓	✓

단, ✓ 는 s_j^i -testable 이고, X 는 s_j^i not testable 이다.

③ s_j^i -testable은 식 (20)에 의해 다음과 같다.

$$s_0^1, s_1^1, s_2^1, s_3^1, s_4^1, s_5^1, s_6^1, s_7^1$$

$$s_0^2, s_1^2, s_2^2, s_3^2, s_4^2, s_6^2, s_8^2$$

2. 다중입력 고장

$f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 에서 2단자 이상의 입력이 $s-a-i$ 고장이 발생된 경우, 즉, $x_{m+i}/u_i, 1 \leq i \leq n-m, m < n,$

$u_i = \{0, 1, 2\}$ 고장인 경우의 함수 f 는 $f_u(x_1, x_2, \dots, x_n) = f(x_1, x_2, \dots, x_m, u_1, u_2, \dots, u_{n-m})$ 으로 표현할 수 있다. 단, u_1, u_2, \dots, u_{n-m} 은 u 의 3치 확장이다. 이때, 다중고장을 $(x_{m+1}, x_{m+2}, \dots, x_n)/u$, $u = \sum_{i=1}^{n-m} u_i 3^{i-1}$ 로 표현하면, $f_u(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 의 스펙트럼 S_u 는 다음과 같다.

$$S_u = \overline{T_3^m} Y_u$$

f 의 스펙트럼 S 는

$$S = \begin{bmatrix} S^0 \\ S^1 \\ S^2 \\ \vdots \\ S^\beta \end{bmatrix}, \quad \beta = 3^{n-m} - 1 \text{과 같으며, } S^i (0 \leq i \leq \beta) \text{는}$$

3^m 개의 원소로 구성되어 있다.

$(x_{m+1}, x_{m+2}, \dots, x_n)/u$ 인 경우의 f 의 부분함수로 표현되는 고장함수의 출력은 Y_u 와 같기 때문에 다음과 같이 표현된다.

$$Y_0^* = Y_1^* = \dots = Y_\beta^* = Y_u, \quad \beta = 3^{n-m} - 1 \quad (21)$$

각 Y 는 3^m 개의 원소를 갖는다. 식 (21)로 부터 고장함수의 스펙트럼을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$S_0^* = S_1^* = \dots = S_\beta^* = S_u, \quad \beta = 3^{n-m} - 1 \quad (22)$$

식 (7)과 (22)로 부터

$$\begin{bmatrix} S^{0^*} & S^{1^*} & \dots & S^{\beta^*} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_0^* & S_1^* & \dots & S_\beta^* \end{bmatrix} \overline{T_3^{n-m}} = \begin{bmatrix} S_u & S_u & \dots & S_u \end{bmatrix} \overline{T_3^{n-m}} \quad (23)$$

따라서,

$$S^{i^*} = \begin{bmatrix} S_u & S_u & \dots & S_u \end{bmatrix} \overline{T_3^{n-m}}, \quad 0 \leq i \leq 3^{n-m} - 1 \quad (24)$$

$$S^{0^*} = 3^{n-m} S_u, \quad S^{\alpha^*} = 0, \quad 1 \leq \alpha \leq \beta \quad (25)$$

$$S_u = \left(\frac{1}{3^{n-m}}\right) \begin{bmatrix} S^0 & S^1 & \dots & S^\beta \end{bmatrix} \overline{T_3^{n-m}} \quad (26)$$

$$S^{0^*} = \begin{bmatrix} S^0 & S^1 & \dots & S^\beta \end{bmatrix} \overline{T_3^{n-m}}, \quad S^{\alpha^*} = 0, \quad 1 \leq \alpha \leq \beta \quad (27)$$

정리 4.

3치 논리회로에서 $(x_{m+1}, x_{m+2}, \dots, x_n)/u$ 와 같이 $(n-m)$ 개의 입력에 의한 다중고장이 발생하는 경우, 정상적인 경우의 스펙트럴 계수 s_j^0 가 (3^{n-m}) 배가 아닌 경우에는 그 고장은 s_j^0 -testable 하다.

(증명)

식 (25)로 부터, $(x_{m+1}, x_{m+2}, \dots, x_n)/u$ 의 고장 발생시 스펙트럴 계수 S^{0^*} 는 S_u 의 (3^{n-m}) 배가 되므로,

로, 정상적인 경우 스펙트럴 계수가 (3^{n-m}) 배가 아닌 것은 s_j^0 -testable 하여 증명된다. Q.E.D.

정리 5.

3치 논리회로의 입력이 $(x_{m+1}, x_{m+2}, \dots, x_n)/u$ 와 같이 $(n-m)$ 개의 다중고장이 발생하는 경우, 다음 조건을 만족하는 경우 그 고장은 s_j^0 -testable 하다.

$$s_j^0 \neq 0, \quad 1 \leq j \leq 3^{n-m} - 1 \quad (28)$$

(증명)

$(x_{m+1}, x_{m+2}, \dots, x_n)/u$ 고장 발생시 스펙트럼은 식 (23), (24), (25)으로 부터

$S^{0^*} = 3^{n-m} S_u, \quad S^{\alpha^*} = 0, \quad 1 \leq \alpha \leq 3^{n-m} - 1$ 가 됨을 알 수 있다. 따라서, $s_j^{0^*} = 0$ 이 되므로 정상회로의 스펙트럴 s_j^0 가 0 아니면, s_j^0 -testable 하다. Q.E.D.

(예 제)

그림 1.의 회로에서 $(x_2, x_3)/5$ 인 고장이 발생된 경우를 살펴보자.

$Y_5 = [a \ a \ a^2]$ 와 식 (20)으로 부터 S_5 를 구하면 다음과 같다.

$$S_5 = \overline{T_3} Y_5 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a^2 \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ a^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2a+a^2 \\ 2+a^2 \\ 2a+a^2 \end{bmatrix}$$

$$S = \begin{bmatrix} S^0 \\ S^1 \\ S^2 \\ \vdots \\ S^8 \end{bmatrix} \text{가 되기 때문에, 정상적인 부분함수의}$$

스펙트럼은 다음과 같다.

$$S^0 = [6a+6a^2, 21+3a, 6a+3a^2],$$

$$S^1 = [6, 6+3a^2, 3], \quad S^2 = [0, 3, 3+3a^2]$$

$$S^3 = [6, 6+3a^2, 3], \quad S^4 = [6a+3a^2, 3a, 3a+3a^2]$$

$$S^5 = [3, 3a+3a^2, 0], \quad S^6 = [0, 3, 3+3a^2]$$

$$S^7 = [3, 3a+3a^2, 0], \quad S^8 = [3+3a, 0, 3a]$$

따라서, $(x_2, x_3)/5$ 의 다중고장이 발생된 경우의 스펙트럴 계수를 식 (25)로 부터 구하면 다음과 같다. ($n-m=2, u=5$ 가 됨)

$$S^{0^*} = 3^2 \cdot S_5 = 9 \begin{bmatrix} 2a+a^2 \\ 2+a^2 \\ 2a+a^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 18a+9a^2 \\ 18+9a^2 \\ 18a+9a^2 \end{bmatrix}$$

$$S^{1^*} = S^{2^*} = \dots = S^{8^*} = 0$$

① $s_j^{0^*}$ -testable ($0 \leq j \leq 2$)

정리 4.로 부터, s_j^0 가 3^{n-m} 배 즉, 3^2 의 배수가 아닌 경우 s_j^0 -testable 하기 때문에,

s_0^0, s_1^0, s_2^0 -testable 하다.

② $s_j^a, 1 \leq a \leq 8$ 테스트 가능 계수는 정리 5.에 의해 구할 수 있다.

$s_0^1, s_1^1, s_2^1, s_0^2, s_1^2, s_2^2, s_0^3, s_1^3, s_2^3, s_0^4, s_1^4, s_2^4,$
 $s_0^5, s_1^5, s_2^5, s_0^6, s_1^6, s_2^6, s_0^7, s_1^7, s_2^7, s_0^8, s_1^8, s_2^8$ 에 각각 테스트 가능하다.

3. 내부선의 고장

3치 논리회로에서 단일 내부선 stuck-at 고장은, 주입력을 제외한 회로내에 있는 어떤 선의 장애로 정의할 수 있다. 이 경우 회로의 출력도 내부선으로 간주된다. 회로의 특정 내부선 g 에 대해, 다음과 같은 함수 모델로 표시할 수 있다.

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) = h(x_1, x_2, \dots, x_n, g),$$

$$g = g(x_1, x_2, \dots, x_n) \tag{29}$$

내부선 g 를 x_{n+1} 의 입력으로 간주한 유수(residual) 회로, $h(x_1, x_2, \dots, x_n, x_{n+1})$ 의 스펙트럴 계수 \hat{S} 를 식 (6) ~ (12)와 유사한 방법으로 구하면 다음과 같다.

$$[\hat{S}_0, \hat{S}_1, \dots, \hat{S}_\beta] = \left(\frac{1}{3}\right) [\hat{S}^0, \hat{S}^1, \dots, \hat{S}^\beta] T_{3,\beta}^1 \tag{30}$$

$$\hat{S}_i = \left(\frac{1}{3}\right) [\hat{S}^0, \hat{S}^1, \dots, \hat{S}^\beta] T_{3,i}^1 \tag{31}$$

$$\hat{S}^i = [\hat{S}_0, \hat{S}_1, \dots, \hat{S}_\beta] \overline{T_{3,i}^1}, \quad \hat{s}_i^a = \left(\frac{1}{3}\right) \sum_{k=0}^2 t_{ki}^k s_j^k \tag{32}$$

단, $0 \leq \beta, i \leq 2, 0 \leq j \leq 3^n - 1$ 이고, $\hat{S}_i^a, \hat{S}^{i^a}$ 는 3^n 개의 원소로 구성됨.

정리 6.

3치 논리회로의 내부선을 g 라 할때, g/i 의 고장은 다음 조건을 만족하면, syndrome 테스트가 가능하다.

$$s_0 \neq \hat{s}_0^0 = \left(\frac{1}{3}\right) \sum_{k=0}^2 t_{k0}^k s_j^k \tag{33}$$

(증명)

g/i 인 경우 회로 N 은 $h(X, i)$ 의 함수가 되고, 식 (30), (31), (32)로 부터 이때의 syndrome은 \hat{s}_0^0 가 됨을 알 수 있다. 즉, 원래의 회로 N 은 n 개의 입력함수인데, 이 식들은 $(n+1)$ 의 입력함수에 대한 스펙트

럴 계수 및 syndrome이므로 $(1/p)$ 배 하여야 회로 N 의 값이 된다. g/i 일 경우 회로 N 의 syndrome을 s_0^* 라고 하면, syndrome 테스트 조건 $s_0 \neq s_0^*$ 와 식 (32)로부터 다음식이 성립하기 때문에 증명된다.

$$s_0^* = \left(\frac{1}{3}\right) \cdot (3 \hat{s}_0^0) = \left(\frac{1}{3}\right) \sum_{k=0}^2 t_{k0}^k s_j^k \tag{Q.E.D.}$$

정리 7.

3치 논리회로의 내부선을 g 라고 할때, g/i 인 경우의 고장은 다음 조건을 만족하면, s_j -testable 하다.

$$s_j \neq \left(\frac{1}{3}\right) \sum_{k=0}^2 t_{kj}^k s_j^k \tag{34}$$

(증명)

식 (31), (32)로부터, g/i 고장인 경우는 $\hat{S}^{i^a} = S_i, \hat{S}^{i^a} = 0, 1 \leq a \leq 2$ 된다.

따라서, $s_j^* = \hat{s}_j^0 = \left(\frac{1}{3}\right) \sum_{k=0}^2 t_{kj}^k s_j^k$ 가 된다. s_j -testable 하기 위해서는 $s_j \neq s_j^*$ 가 성립하여야 되기 때문에 증명된다. Q.E.D.

(예 제)

그림 1.에서 내부선을 g 라고 할때, g/i 에 대한 고장은 정리 6.과 정리 7.을 이용하여 테스트 가능한 스펙트럴 계수를 구할 수 있다.

(i) 식 (34)로부터 g/i 의 syndrome을 구하면, $g/0$ 인 경우 0, $g/1$ 인 경우 $(18a+9a^2)$ 이고, $g/2$ 인 경우의 syndrome은 $27a^2$ 이 된다. 따라서, 정상적인 경우의 syndrome $(6a+6a^2)$ 과 다르기 때문에 정리 6.에 의해 g/i 고장은 syndrome 테스트가 가능하다.

(ii) 정리 7.을 이용하여, g/i 인 경우의 스펙트럴 계수를 구하면 다음과 같다.

$g/0$ 인 경우 :

$$S^{0^*} = [0, 27, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]', \quad S^{1^*} = S^{2^*} = 0$$

$g/1$ 인 경우 :

$$S^{0^*} = [18a+9a^2, 18+9a, 18a+9a^2, 0, 0, 0, 0, 0, 0]', \quad S^{1^*} = S^{2^*} = 0$$

$g/2$ 인 경우 :

$$S^{0^*} = [27a^2, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]', \quad S^{1^*} = S^{2^*} = 0$$

따라서, $s_0^0, s_0^1, s_0^2, s_1^0, s_1^1, s_1^2$ 계수로는 테스트 가능하지 않고, 나머지 계수는 테스트 가능하다.

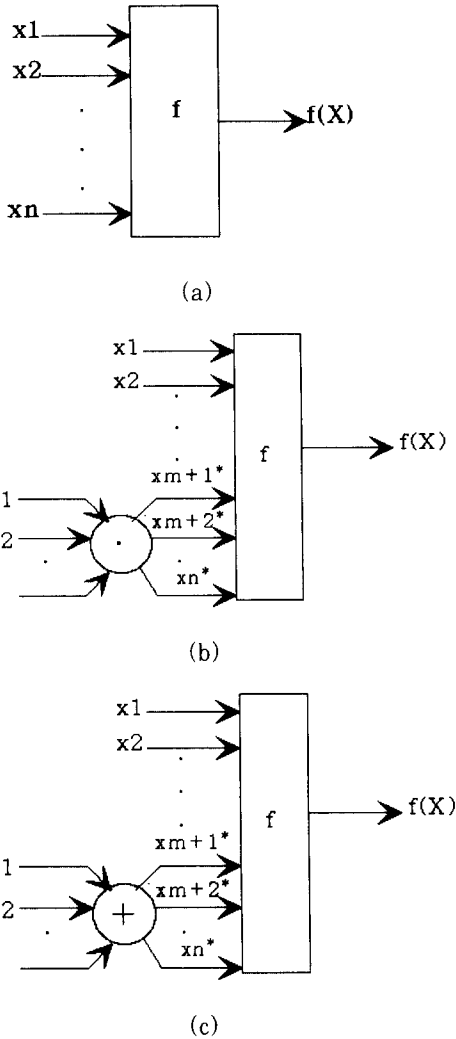


그림 2. 3치 논리회로의 min/max bridging 고장 모델

- (a) 정상회로 (b) Min 입력 bridging 고장
- (c) Max 입력 bridging 고장

Fig. 2. Min/Max bridging fault model of ternary logic.

- (a) fault free network (b) Min input bridging fault (c) Max input bridging fault

4. Min/Max bridging 고장

Min/max bridging 고장이란 두개 이상의 입력 단자가 서로 min 혹은 max 형태로 단락되어, 각 선들의 min 값 혹은 max 값으로 입력되는 고장모델로서 그림 2와 같이 나타낼 수 있다. 이 같이 두개 이상의 선들이 min 혹은 max 단락되는 경우에는 stuck-at

고장 모델과는 다르게 해석하여야 만이 고장 검출이 가능한 경우가 존재한다.

1) Min bridging 고장

함수 $f(X)$ 를 실현하는 3치 논리조합회로에서, min 입력 bridging 고장이란 입력변수 일부가 min 형태로 단락 되어, 그 입력변수들의 min 값이 각각의 입력으로 동작되는 고장이다. 이 고장함수를 $f^*(X)$ 라 하고, min bridging된 입력을 $(x_{m+1}, x_{m+2}, \dots, x_n)$ 이라고 하자.

따라서 입력 $x_{m+a} = x_{m+a} / \min(x_{m+1}, x_{m+2}, \dots, x_n)$, $1 \leq a \leq n-m$, ($n < m$)가 된다.

또한, $f_u(x_1, x_2, \dots, x_n) = f(x_1, x_2, \dots, x_m, u_1, u_2, \dots, u_{n-m})$ 로 표현할 수 있다. 단, u_1, u_2, \dots, u_{n-m} 은 u 의 3치 확장이다. S_u 는 함수 $f_u(x_1, x_2, \dots, x_m)$ 의 스펙트럼이고, min bridging 고장을 $(x_{m+1}, x_{m+2}, \dots, x_n) / \min(u)$, $u = \sum_{i=1}^{n-m} u_i 3^{i-1}$ 로 표현하자.

정리 8.

3치 논리회로의 입력 $(x_1, x_2, \dots, x_m, x_{m+1}, \dots, x_n)$ 중에서, $(x_{m+1}, x_{m+2}, \dots, x_n)$ 의 입력이 min bridging 고장 발생시의 부분함수를 f_u 라 하면, min bridging 고장 발생시 각 부분함수의 스펙트럼은 다음과 같다.

- (i) $0 \leq u \leq (\frac{\beta+1}{3})-1$ 인 경우의 각 부분함수의 스펙트럴 계수는 S_0 와 같다.
- (ii) $(\frac{\beta+1}{3}) \leq u \leq \beta-1$ 인 경우의 각 부분함수의 스펙트럴 계수는 S_α 와 같다. 단, $\alpha \in \{0, \sum_{i=1}^{n-m} 3^{i-1}\}$ 이다.
- (iii) $u = \beta$ 인 경우의 스펙트럴 계수는 S_β 가 된다. 단,

$$\beta = \sum_{i=1}^{n-m} 2 \cdot 3^{i-1} = 3^{n-m} - 1.$$

(증명)

먼저 부분함수 $f_u(x_1, x_2, \dots, x_m)$ 의 스펙트럼을 S_u 라 하고, (i), (ii), (iii) 각각에 대해 증명한다.

- (i) $0 \leq u \leq (\frac{\beta+1}{3})-1$ 인 경우

$u_{n-m} = 0$ 인 경우로, $\min(u_1, u_2, \dots, u_{n-m-1}, 0) = 0$ 이 되므로, min bridging 고장시의 모든 함수 f_u 는 f_0 가 된다. 따라서, 이때의 스펙트럼 역시 S_0 가 된다.

- (ii) $(\frac{\beta+1}{3}) \leq u \leq \beta-1$ 인 경우

이 경우 $u_i \in \{0, 1, 2\}$, ($1 \leq i \leq n-m$)가 되므로, $\min(u_1, u_2, \dots, u_{n-m}) \in \{0, 1\}$ 의 값을 갖게 된다. 따라서, f_u 는 f_α 가 되고, 스펙트럴 계수는 S_α 가 된다. 단,

$$\alpha \in \{0, \sum_{i=1}^{n-m} 3^{i-1}\}.$$

(iii) $u = \beta$ 인 경우

모든 $u_i = 2$, ($1 \leq i \leq n-m$) 값을 가지므로, \min

$(u_1, u_2, \dots, u_{n-m}) = 2$ 가 된다. 따라서, $f_u^* = f_\beta$ 가 되

고, S_β 의 스펙트럴 값을 갖게 된다. Q.E.D.

(예제) $n=4, m=1$ 인 3치 논리회로

$$f_1^*, f_2^*, \dots, f_8^* = f_0 \text{ ---} \rightarrow S_0$$

$$f_9^*, f_{10}^*, \dots, f_{25}^* = f_0 \text{ or } f_{13} \text{ ---} \rightarrow S_0 \text{ or } S_{13}$$

$$f_{26}^* = f_{26} \text{ ---} \rightarrow S_{26} \text{ 이 된다.}$$

정리 9.

함수 $f(x_1, x_2, \dots, x_m, x_{m+1}, \dots, x_n)$ 에서 $(x_{m+1}, x_{m+2}, \dots, x_n)$ 입력이 min bridging 고장인 경우, 다음 식을 만족하는 경우 s_j^i -testable 하다.

$$s_j^i \neq \sum_{k=0}^{(\beta+1)-1} t_{ki}^{n-m} s_{0j} + \sum_{k=\beta+1}^{\beta-1} t_{ki}^{n-m} s_{\alpha j} + t_{\beta i}^{n-m} s_{\beta j} \quad (35)$$

단, $\beta = 3^{n-m} - 1, 0 \leq i \leq \beta, 0 \leq j \leq 3^m - 1, \alpha \in \{0, \sum_{i=1}^{n-m} 3^{i-1}\}$

(증명)

정리 8.로 부터, min bridging 고장시 각 부분함수의 스펙트럼은 다음과 같다.

$$[S_0^* S_1^* \dots S_{(\frac{\beta+1}{3}-1)}^* S_{(\frac{\beta+1}{3})}^* \dots S_{\beta-1}^* S_{\beta}^*] \quad (36)$$

$$= [S_0 S_0 \dots S_0 S_\alpha \dots S_\alpha S_\beta]$$

식 (7)과 (36)으로 부터

$$[S_0^* S_1^* \dots S_{(\frac{\beta+1}{3}-1)}^* S_{(\frac{\beta+1}{3})}^* \dots S_{\beta-1}^* S_{\beta}^*] \quad (37)$$

$$= [S_0 S_0 \dots S_0 S_\alpha \dots S_\alpha S_\beta] \overline{T_3^{n-m}}$$

$$S_i^* = [S_0 S_0 \dots S_0 S_\alpha \dots S_\alpha S_\beta] \overline{T_3^{n-m}} \quad (38)$$

$$s_j^i \neq \sum_{k=0}^{(\beta+1)-1} t_{ki}^{n-m} s_{0j} + \sum_{k=\beta+1}^{\beta-1} t_{ki}^{n-m} s_{\alpha j} + t_{\beta i}^{n-m} s_{\beta j}$$

$s_j^i \neq s_j^i$ 이면, 테스트 가능하기 때문에 증명된다.

Q.E.D.

(예제)

그림 1.에서 $\min(x_2, x_1)$ bridging 고장에 대해 분석하면 다음과 같다.

정리 8.에 의해 고장시의 부분함수와 스펙트럼을 구하면 다음과 같다.

여기서, $\beta = 8, n-m = 2, (\frac{\beta+1}{3}) = 3$ 이 된다.

표 1. $\min(x_2, x_1)$ bridging 고장시 부분함수와 스펙트럼

Table 1. The subfunction and spectrum of $\min(x_2, x_1)$ bridging fault.

u	x ₂	x ₁	x ₃	f*	S
0	0	0	d	f ₀	----> S ₀
1	0	1	d	f ₀	----> S ₀
2	0	2	d	f ₀	----> S ₀
3	1	0	d	f ₀	----> S ₀
4	1	1	d	f ₄	----> S ₄
5	1	2	d	f ₄	----> S ₄
6	2	0	d	f ₀	----> S ₀
7	2	1	d	f ₄	----> S ₄
8	2	2	d	f ₈	----> S ₈

부분함수 Y_0, Y_4, Y_8 를 이용하여, 그 스펙트럴 계수를 아래와 같이 구할 수 있다.

x ₂	x ₁	x ₃	Y ₀	x ₂	x ₁	x ₃	Y ₄	x ₂	x ₁	x ₃	Y ₈
0	0	0	1	1	1	0	a	2	2	0	a ²
0	0	1	1	1	1	1	a	2	2	1	a ²
0	0	2	1	1	1	2	a	2	2	2	a ²

$$S_0 = \overline{T_3} Y_0$$

$$= \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a & a \\ 1 & a & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 3 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$S_4 = \overline{T_3} Y_4$$

$$= \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ a \\ a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3a \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$S_8 = \overline{T_3} Y_8$$

$$= \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a^2 \\ a^2 \\ a^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3a^2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

정리 9.와 식 (35)로 부터 s_j^i -testable인 경우를 다음과 같이 구할 수 있다.

$s_j^i = \sum_{k=0}^2 \overline{t_{ki}^2} s_{0j} + \sum_{k=3}^7 \overline{t_{ki}^2} s_{\alpha j} + \overline{t_{8i}^2} s_{8j}$ 가 된다. 단, $\alpha = 0$ 혹은 4이다.

예를 들어,

①

$$s_0^0 = \sum_{k=0}^2 \overline{t_{k0}^2} s_{02} + \sum_{k=3}^7 \overline{t_{k0}^2} s_{\alpha 2} + \overline{t_{80}^2} s_{82}$$

$$= (\overline{t_{00}^2} s_{02} + \overline{t_{10}^2} s_{02} + \overline{t_{20}^2} s_{02}) +$$

$$(\overline{t_{30}^2} s_{02} + \overline{t_{40}^2} s_{42} + \overline{t_{50}^2} s_{42} + \overline{t_{60}^2} s_{02} + \overline{t_{70}^2} s_{42})$$

$$+ \overline{t_{80}^2} s_{82} = 0$$

따라서, $s_2^0 = s_2^0$ 이기 때문에, s_2^0 -not testable 하다.

②

$$\begin{aligned}
 s_3^0 &= \sum_{k=0}^2 \overline{t_{k0}^2} s_{00} + \sum_{k=0}^1 \overline{t_{k0}^2} s_{a0} + \overline{t_{83}^2} s_{80} \\
 &= (\overline{t_{03}^2} s_{00} + \overline{t_{13}^2} s_{00} + \overline{t_{23}^2} s_{00}) \\
 &\quad + (\overline{t_{33}^2} s_{00} + \overline{t_{43}^2} s_{a0} + \overline{t_{53}^2} s_{a0} + \overline{t_{63}^2} s_{00} + \overline{t_{73}^2} s_{a0}) \\
 &\quad + \overline{t_{83}^2} s_{80} = 15 + 3a^2
 \end{aligned}$$

따라서, $s_3^0 (=6) \neq s_3^0$ 이기 때문에 s_3^0 -testable 하다. 이 같은 방법으로, 모든 $s^i, 0 \leq i \leq 8$ 의 계수를 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 S^0 &= [0, 0, 0], S^1 = [15+3a, 0, 0], S^2 = [6+3a^2, 0, 0] \\
 S^3 &= [15+3a^2, 0, 0], S^4 = [12a+6a^2, 0, 0], S^5 = [3a+6a^2, 0, 0] \\
 S^6 &= [6+3a^2, 0, 0], S^7 = [3a+6a^2, 0, 0], S^8 = [3+6a, 0, 0]
 \end{aligned}$$

정리 9. 에 의해 다음과 같은 테스트 가능 계수를 구할 수 있다.

표 2. Min(x_2, x_1) bridging 고장에 대한 테스트 가능 계수

Table 2. The testable coefficients of Min(x_2, x_1) bridging fault.

(x_2, x_1)/min u	Testable 스펙트럴 계수
(x_2, x_1)/min 0	S_0^0, S_1^0
(x_2, x_1)/min 1	S_0^1, S_1^1, S_2^1
(x_2, x_1)/min 2	S_0^2, S_1^2, S_2^2
(x_2, x_1)/min 3	S_0^3, S_1^3, S_2^3
(x_2, x_1)/min 4	S_0^4, S_1^4, S_2^4
(x_2, x_1)/min 5	S_0^5, S_1^5
(x_2, x_1)/min 6	S_0^6, S_1^6, S_2^6
(x_2, x_1)/min 7	S_0^7, S_1^7
(x_2, x_1)/min 8	S_0^8, S_2^8

2) Max bridging 고장

함수 $f(X)$ 를 실현하는 3치 논리조합회로에서, max 입력 bridging 고장이란 입력변수 일부가 단락 되어, 그 입력변수들의 max 값이 각각의 입력으로 동작하는 고장이다. 고장으로 구현되는 함수를 $f^*(X)$ 라 하고, max bridging된 입력은 ($x_{m+1}, x_{m+2}, \dots, x_n$)라고 하자.

즉, 이 경우 x_{m+a} 는 $x_{m+a} / \max(x_{m+1}, x_{m+2}, \dots, x_n)$, $1 \leq a \leq n-m$, ($n < m$)가 된다.

$f_u(x_1, x_2, \dots, x_n) = f(x_1, x_2, \dots, x_m, u_1, u_2, \dots, u_{n-m})$ 로 표현할 수 있다. 여기서 u_1, u_2, \dots, u_{n-m} 은 u 의 3치 확장이다. S_u 는 함수 $f_u(x_1, x_2, \dots, x_m)$ 의 스펙트럼 이고, max bridging 고장을 ($x_{m+1}, x_{m+2},$

\dots, x_n)/max(u), $u = \sum_{i=1}^{n-m} u_i 3^{i-1}$ 로 표현하자.

3치 논리회로의 입력 ($x_1, x_2, \dots, x_m, x_{m+1}, \dots, x_n$) 중에서, ($x_{m+1}, x_{m+2}, \dots, x_n$)의 입력이 max bridging 고장 발생시, 각 부분함수의 스펙트럼은 다음과 같다.

정리 10.

(i) $u=0$ 인 경우의 각 부분함수의 스펙트럴 계수는 S_0 와 같다.

(ii) $1 \leq u \leq (3^{n-m} - 3^{n-m-1}) - 1$ 인 경우의 각 부분함수의 스펙트럴 계수는 S_a 와 같다.

단, $a \in \{ \sum_{i=1}^{n-m} 3^{i-1}, 2 \sum_{i=1}^{n-m} 3^{i-1} \}$ 이다.

(iii) $(3^{n-m} - 3^{n-m-1}) \leq u \leq \beta$, 단, $\beta = 3^{n-m} - 1$ 경우의 스펙트럴 계수는 S_β 가 된다.

(증명)

부분함수 $f_u(x_1, x_2, \dots, x_m)$ 의 스펙트럼을 S_u 라 하고,

(i), (ii), (iii) 각각에 대해 증명하면 다음과 같다.

(i) $u=0$ 인 경우

모든 $u_i, (1 \leq i \leq n-m)$ 가 0이므로, $\max(u_1, u_2, \dots, u_{n-m}) = 0$ 가 되고, max bridging 고장시의 모든 함수 f_u^* 함수는 f_0 가 된다. 따라서, 이때의 스펙트럼은 S_0 가 된다.

(ii) $1 \leq u \leq (3^{n-m} - 3^{n-m-1}) - 1$ 인 경우

이 경우 $u_i \in \{0, 1, 2\}, (1 \leq i \leq n-m)$ 이 되므로, $\max(u_1, u_2, \dots, u_{n-m}) \in \{1, 2\}$ 의 값을 갖게 된다. 따라서, f_u^* 는 f_a 가 되고 이때의 스펙트럴 계수는 S_a 가 된다.

단, $a \in \{ \sum_{i=1}^{n-m} 3^{i-1}, 2 \sum_{i=1}^{n-m} 3^{i-1} \}$ 이다.

(iii) $(3^{n-m} - 3^{n-m-1}) \leq u \leq \beta$ 인 경우

이 경우 $u_{n-m} = 2$ 이기 때문에, $\max(u_1, u_2, \dots, u_{n-m}) = 2$ 가 된다. 따라서, $f_u^* = f_\beta$ 가 되고, S_β 의 스펙트럼 값을 갖게 된다. Q.E.D.

(예제) $n=4, m=1$ 인 경우

$$f_0^* = f_0 \longrightarrow S_0$$

$$f_1^*, f_2^*, \dots, f_{17}^* = f_{13} \text{ or } f_{26} \longrightarrow S_{13} \text{ or } S_{26}$$

$$f_{18}^*, f_{19}^*, \dots, f_{26}^* = f_{26} \longrightarrow S_{26} \text{ 이 된다.}$$

정리 11.

함수 $f(x_1, x_2, \dots, x_m, x_{m+1}, \dots, x_n)$ 에서 ($x_{m+1}, x_{m+2}, \dots, x_n$) 입력이 max bridging 고장인 경우, 그 고장은 다음 식을 만족하는 경우 s_j^i -testable 하다.

$$s_j^i \neq \overline{t_{0i}^{n-m}} s_{0j} + \sum_{k=1}^{\gamma-1} \overline{t_{ki}^{n-m}} s_{aj} + \sum_{k=\gamma}^{\beta} \overline{t_{ki}^{n-m}} s_{\beta j} \quad (39)$$

단, $\beta = 3^{n-m} - 1$, $0 \leq i \leq \beta$, $0 \leq j \leq 3^m - 1$, $\gamma = 3^{n-m} - 3^{n-m-1}$.

$\alpha \in \{ \sum_{i=1}^{n-m} 3^{i-1}, 2 \sum_{i=1}^{n-m} 3^{i-1} \}$ 이다.

(증명)

정리 10.으로 부터, max bridging 고장시 각 부분함수의 스펙트럼은 다음과 같다.

$$[S_0^* S_1^* \cdots S_{\gamma-1}^* S_{\gamma}^* \cdots S_{\beta}^*] = [S_0 S_a \cdots S_a S_{\beta} \cdots S_{\beta}] \quad (40)$$

식 (7) 과 (40)으로 부터

$$[S^{0*} S^{1*} \cdots S^{\gamma-1*} S^{\gamma*} \cdots S^{\beta*}] = [S_0 S_a \cdots S_a S_{\beta} \cdots S_{\beta}] \overline{T_{3^i}^{n-m}} \quad (41)$$

$$S^{i*} = [S_0 S_a \cdots S_a S_{\beta} \cdots S_{\beta}] \overline{T_{3^i}^{n-m}} \quad (42)$$

$$s_j^{i*} = \overline{t_{0i}^{n-m}} s_{0j} + \sum_{k=1}^{\gamma-1} \overline{t_{ki}^{n-m}} s_{aj} + \sum_{k=\gamma}^{\beta} \overline{t_{ki}^{n-m}} s_{\beta j} \quad (43)$$

$s_j^i \neq s_j^{i*}$ 이면, 테스트 가능하기 때문에 증명된다.

Q.E.D.

(예제)

그림 1. 에서 $\max(x_3, x_2)$ bridging 고장에 대해 분석하면 다음과 같다.

정리 10.에 의해 다음과 같이 고장시의 부분함수와 스펙트럼을 구할 수 있다.

여기서, $\beta = 8$, $n-m = 2$, $\gamma = 3^2 - 3^1 = 6$, $0 \leq i \leq 8$, $0 \leq j \leq 2$ 이 된다.

표 3. $\max(x_3, x_2)$ bridging 고장시 부분함수와 스펙트럼 계수

Table 3. The subfunction and spectrum of $\max(x_3, x_2)$ bridging fault.

u	x_3	x_2	x_1	f^*	S^*
0	0	0	d	f_0	----> S_0
1	0	1	d	f_4	----> S_4
2	0	2	d	f_8	----> S_8
3	1	0	d	f_4	----> S_4
4	1	1	d	f_4	----> S_4
5	1	2	d	f_8	----> S_8
6	2	0	d	f_8	----> S_8
7	2	1	d	f_8	----> S_8
8	2	2	d	f_8	----> S_8

또한, 부분함수 Y_0, Y_4, Y_8 를 이용하여, 그 스펙트럼 계수를 구할 수 있다.

x_2	x_1	x_3	Y_0	x_2	x_1	x_3	Y_4	x_2	x_1	x_3	Y_8
0	0	0	1	1	1	0	a	2	2	0	a^2
0	0	1	a	1	1	1	a	2	2	1	a^2
0	0	2	a^2	1	1	2	a^2	2	2	2	a^2

$$S_0 = \overline{T_3^1} Y_0 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a^2 \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ a \\ a^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 3 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$S_4 = \overline{T_3^1} Y_4 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a^2 \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ a \\ a^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2a+a^2 \\ 2+a \\ 2a+a^2 \end{bmatrix}$$

$$S_8 = \overline{T_3^1} Y_8 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a^2 \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a^2 \\ a^2 \\ a^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3a^2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

식 (39)로 부터 s_j^i -testable 인 경우를 아래와 같이 구할 수 있다.

$s_j^{i*} = \overline{t_{0i}^{\alpha}} s_{0j} + \sum_{k=1}^{\gamma-1} \overline{t_{ki}^{\alpha}} s_{aj} + \sum_{k=\gamma}^{\beta} \overline{t_{ki}^{\alpha}} s_{\beta j}$ 가 된다. 단, $\alpha = 4$ 혹은 8이고, $\gamma = 6$, $\beta = 8$ 이다.

예를 들어,

①

$$\begin{aligned} s_1^{3*} &= \overline{t_{03}^4} s_{01} + \sum_{k=1}^5 \overline{t_{k3}^4} s_{a1} + \sum_{k=6}^8 \overline{t_{k3}^4} s_{\beta 1} \\ &= \overline{t_{03}^4} s_{01} + \{ \overline{t_{13}^4} s_{41} + \overline{t_{23}^4} s_{81} + \overline{t_{33}^4} s_{41} + \overline{t_{43}^4} s_{41} + \overline{t_{53}^4} s_{81} \} \\ &\quad + \{ \overline{t_{63}^4} s_{81} + \overline{t_{73}^4} s_{81} + \overline{t_{83}^4} s_{81} \} \\ &= 6 + 3a^2 \end{aligned}$$

따라서, $s_1^3 (= 6 + 3a^2) = s_1^{3*}$ 이기 때문에 s_1^3 -not testable 하다.

②

$$\begin{aligned} s_2^{3*} &= \overline{t_{03}^4} s_{02} + \sum_{k=1}^5 \overline{t_{k3}^4} s_{a2} + \sum_{k=6}^8 \overline{t_{k3}^4} s_{\beta 2} \\ &= \overline{t_{03}^4} s_{02} + \{ \overline{t_{13}^4} s_{42} + \overline{t_{23}^4} s_{82} + \overline{t_{33}^4} s_{42} + \overline{t_{43}^4} s_{42} + \overline{t_{53}^4} s_{82} \} \\ &\quad + \{ \overline{t_{63}^4} s_{82} + \overline{t_{73}^4} s_{82} + \overline{t_{83}^4} s_{82} \} \\ &= 3 + 3a \end{aligned}$$

따라서, $s_2^3 (= 3) \neq s_2^{3*}$ 이기 때문에 s_2^3 -testable 하다.

같은 방법으로, 모든 S^{i*} , $0 \leq i \leq 8$ 의 계수를 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} S^{0*} &= [6a + 18a^2, 9 + 3a, 6a + 3a^2], & S^{1*} &= [9 + 3a, 6 + 3a^2, 3 + 3a] \\ S^{2*} &= [6 + 3a^2, 3 + 3a, 3a^2], & S^{3*} &= [9 + 3a, 6 + 3a^2, 3 + 3a] \\ S^{4*} &= [6 + 3a^2, 3 + 3a^2, 3], & S^{5*} &= [3 + 3a, 3, 0] \\ S^{6*} &= [6 + 3a^2, 3 + 3a, 3a^2], & S^{7*} &= [3 + 3a, 3, 0] \\ S^{8*} &= [3a^2, 0, 3 + 3a] \end{aligned}$$

정리 11. 에 의해 다음과 같은 테스트 가능 계수를 구할 수 있다.

표 4. Max(x₃, x₂) bridging 고장에 대한 테스트 가능 계수

Table 4. The testable coefficients of Max(x₃, x₂) bridging fault.

(x ₃ , x ₂)/max u	Testable 스펙트럴 계수
(x ₃ , x ₂)/max 0	s ₀ ⁰ , s ₁ ⁰
(x ₃ , x ₂)/max 1	s ₀ ¹ , s ₂ ¹
(x ₃ , x ₂)/max 2	s ₀ ² , s ₁ ² , s ₂ ²
(x ₃ , x ₂)/max 3	s ₀ ³ , s ₂ ³
(x ₃ , x ₂)/max 4	s ₁ ⁴ , s ₂ ⁴
(x ₃ , x ₂)/max 5	s ₀ ⁵ , s ₁ ⁵
(x ₃ , x ₂)/max 6	s ₀ ⁶ , s ₁ ⁶ , s ₂ ⁶
(x ₃ , x ₂)/max 7	s ₀ ⁷ , s ₁ ⁷
(x ₃ , x ₂)/max 8	s ₀ ⁸ , s ₂ ⁸

IV. 결 론

3치 논리회로의 고장검출을 위해 스펙트럴 계수를 이용하는 방법을 제안하였다. 본 논문은 테스트 벡터의 생성없이 회로의 모든 입력조합을 인가하여 얻어진 스펙트럴 계수로 된 출력 데이터의 분석을 통하여, 고장을 검출할 수 있도록 하므로서, 3치 논리회로 설계시 고장분석 및 검출이 가능하도록 하였다. 따라서, 테스트 벡터에 의한 검출시 필요한 대용량의 출력 데이터 및 테스트 벡터 저장을 위한 메모리가 필요 없고, 테스트 벡터 생성을 위한 복잡한 연산을 최소화할 수 있게 되었다. 3치 논리회로의 단일입력, 다중입력 및 내부회로에서의 s-a 고장 대한 syndrome 테스트 방법과 그 밖의 계수의 고장 검출조건에 따른 특성을 조사하여 고장 테스트가 가능함을 보여주었다. 또한 3치 논리회로의 구현시 기본 함수 모듈인 Min/Max bridging 고장에 대한 스펙트럴 영역에서의 고장검출 조건을 유도하였고, 예를 통해 그 유용성을 입증하였다. 향후의 연구방향은 이와 같이 얻어진 테스트 가능한 계수들 중에서 전체 고장을 커버하는 최소수의 계수들의 집합을 찾는 것과 고장 모델의 다양화를 통한 고장검출 영역을 확대하는 일이다.

참 고 문 헌

[1] A.Tzidon, I.Berger, and M.Yoeli, "A

practical approach to fault detection in combinational networks," IEEE Trans. Comput., vol.c-27, pp.968-971, Oct. 1978.

- [2] Jacob Savir, "Syndrome-testable design of combinational circuits," IEEE Trans. on Comput., vol. c-29, pp.442-451, June 1980.
- [3] D.M. Miller and J.C. Muzio, "Spectral fault signatures for single stuck-at faults in combinational networks," IEEE Trans. on Comput., vol. c-33, pp. 765-769, Aug. 1984.
- [4] D.M. Miller and J.C. Muzio, "Spectral fault signatures for internally unate combinational networks," IEEE Trans. On Compt., vol. c-32, pp. 1058-1069, Nov. 1983.
- [5] P.K. Lui and J.C. Muzio, "Spectral signature testing of multiple stuck-at faults in irredundant combinational networks," IEEE Trans. on Compt., vol. c_35, pp. 1088-1092, DEC. 1986.
- [6] S.L. Hurst, D.M. Miller, and J.C. Muzio, *Spectral Techniques in Digital Logic*, New York, Academic Press, 1985.
- [7] M.G. Karpovsky, *Spectral Techniques and Fault Detection*, New York, Academic Press, 1985.
- [8] V.H. Tokmen, "Disjoint decomposability of multi-valued functions by spectral means," Proc. on 10th ISMVL, pp. 88-93, 1980.
- [9] J.C. Muzio, *Multiple-valued switching theory*, Accord, Adam Hilger, 1986.
- [10] Y. M. Ajabnoor and M. H. Abd-El Barr, "Stuck-type fault detection in multi-valued combinational circuits," Proc. of 11th ISMVL, pp. 275-282, May 1981.
- [11] H. Y. Lo and S. C. Lee, "A map-partition method for the fault detection of multivalued and multi-level combinational logic circuits," Proc. of 11th ISMVL, pp. 283-289, May 1981.
- [12] H. Lu and S. C. Lee, "Fault detection in M-logic circuits using the M-diffe-

- rence," Proc. of 14th ISMVL, pp. 62-70, May 1984.
- [13] T. A. Guima and M. A. Tapia, "Differential calculus for fault detection in multivalued logic networks," Proc. of 17th ISMVL, pp. 99-108, May 1987.
- [14] M. Whitney and J. Muzio, "Decisive difference and partial differences stuck-at fault detection in MVL circuits," Proc. of 18th ISMVL, pp. 321-328, May 1988.
- [15] T. Damarla, "Generalized transforms for multiple valued circuits and their fault detection," IEEE Trans. on Comput., vol. C-41, pp. 1101-1109, Sept. 1992.

 — 저 자 소 개 —


金 鍾 五(正會員)

1957年 12月 17日生. 1980年 2月 인하대학교 전자공학과(공학사). 1982年 2月 서울대학교 대학원 제어계측공학과(공학석사). 1990年 9月 ~ 현재 인하대학교 대학원 전자공학과 박사

과정. 1982年 11月 ~ 1989年 9月 금성사 정보기기 연구소 선임 연구원. 1989年 9月 ~ 현재 동양공업전문대학 전자과 부교수. 주관심 분야는 회로 및 시스템 설계, 다치논리회로 설계, 퍼지논리, 고장 검출, 마이크로프로세서 응용 등임.


金 榮 濼(正會員)

1954年 4月 8日生. 1977年 2月 인하대학교 전자공학과(공학사). 1981年 2月 인하대학교 대학원 전자공학과(공학석사). 1995年 8月 인하대학교 대학원 전자공학과(공학박사). 1984年 8月 ~ 1993年 2

月 부천전문대학 전자계산과 부교수. 1994년 3月 ~ 현재 안산전문대학 전산정보처리과 조교수, 전산소장. 주관심 분야는 회로 및 시스템 설계, 다치논리회로 설계, 퍼지논리 등임.

金 興 壽(正會員) 第 32 卷 B 編 第 6 號 參照

현재 인하대학교 전자공학과 교수