

고성능 결함감내 스위칭 망과 결함 진단법

(A High-Performance Fault-Tolerant Switching Network and Its Fault Diagnosis)

박 재 현 ^{*}

(Jae-Hyun Park)

요약 본 논문에서는 편향 자기 경로 제어 방법을 사용하는 새로운 고성능 고장 감내 스위칭 망을 제시하고, 이 스위칭 망의 고장 진단 방법을 제안한다. 우리는 기본 스위치인 벤안 망의 각 스위칭 단계들이 하나의 순환 군의 나열로 구성되어 있다는 사실과 자기 경로제어 관점에서 인접한 스위칭 단계들 간에 준동형(Homomorphism)이 존재하기 때문에, 모든 각 단계의 순환 군이 이 다음 단계의 부분군이고, 이들 단계들로 구성된 펙터 군이 존재한다는 성질과 사용하여, 결함이 생긴 링크들을 우회하는 대체 경로들로 추가한 링크들을 포함하는 모든 링크들을 사용하는 확장 벤안 망인 다단 스위칭 망을 제시한다. 그리고 이 망의 성능을 시뮬레이션을 통해서 분석하여, 성능의 우수함을 보인다. 또한 이들 다중 경로를 제공하는 스위칭 망을 사용하는데 필수적인 결함 진단법을 제시한다.

키워드 : 확장 벤안 망 위상 특성들, 대수적 해석, 결함 감내 셀 스위칭 망, 완전 적응 자기 경로제어, 결함 진단법

Abstract In this paper, we present a high-performance fault-tolerant switching networks using a deflection self-routing scheme, and present fault-diagnosis method for the network. We use the facts: 1) Each stage of the Banyan network is arrayed as the sequences of a Cyclic group of SEs. 2) There is the homomorphism between adjacent stages from a view of self-routing, so that all of each Cyclic group is the subgroup of the Cyclic group in the next stage, and there are factor groups due to such subgroup and homomorphism. We provide high-performance fault-tolerant switching networks of which the all links including augmented links are used as the alternate links detouring faulty links. We also present the fault diagnosis scheme for the proposed switching network that provide multiple paths for each input-output pair.

Key words : Topological Properties, Augmented Banyan Network, Fault-Tolerant Cell Switching Network, Fully-adaptive Self-routing, Fault Diagnosis

1. 서론

고품질의 서비스를 제공하기 위해서, 스위칭 시스템은 중단없이 운영되어야 하며, 일반적으로 고신뢰성을 제공한다. 스위칭 망의 신뢰성은 스위칭 시스템이 신뢰성을 제공하는데 중요하다. 또한 최근에 다른 응용으로 분산/병렬 센서 망을 구성하는데 있어 널리 사용되고 있는데, 스위칭 망은 처리장치들과 분산된 센서 배열들 사이의 상호연결 망으로써 널리 사용되고 있다[1]. 성능과 결함 감내성은 이러한 응용들에 있어 가장 중요하게 고려되어야 할 점들이다.

벤안 망은 일반성과 다양성을 가지고 있어 많은 다단 스위칭 망들의 기반망으로 널리 사용되고 있다[1]. 그러나 벤안 망은 각 입출력 쌍에 대해서 각각 유일한 경로만을 갖기 때문에 결함감내성이 없다는 문제점을 가지고 있다[2-7]. 이 신뢰성 문제를 해결하기 위해, 많은 기법들이 개발되어 왔다[1-7]. 이들 연구들은 라우팅 망 앞에 분산 망을 추가하거나, 여러 스위칭 망을 병렬로 사용하거나, 셀을 다시 입력버퍼에 넣거나, 스위칭 망에 하나 이상의 스위칭 단을 추가하거나, 셀을 편향(Deflection)시키거나, 내부에 추가적인 링크를 넣거나 [1,7], 외부 속도에 비해 스위칭 망 내부의 속도를 증가시키거나, 내부 버퍼를 사용하거나, 다중 경로 스위칭 망을 사용하는 방법들이다[1-4]. 그러나 이들 대부분은 지나치게 많은 하드웨어를 필요로 하거나, 복잡한 라우

* 이 논문은 2003년도 중앙대학교 학술연구비 지원에 의한 것이다

† 정 회 원 : 중앙대학교 컴퓨터공학부 교수
hyunie@cau.ac.kr

논문접수 : 2003년 9월 24일
심사완료 : 2004년 3월 4일

팅 방법을 필요로 하기도 하고, 심지어 둘 다 필요로 하기도 한다. 그리고 이들 작업들은 벤안 망의 위상적 특성들을 일부만 사용하였다[1-7].

벤안 망을 기반하지 않은 망들을 결합 감내성을 가지는 다단 스위칭 망 구조로 제안한 연구들이 있어왔다. 예를 들어 베니쉬(Benes) 망과 클로스(Clos) 망, 그리고 다중/병렬 벤안 망과 Itoh의 망 및 Hui의 망, 그리고 완전 체인된 감마 상호연결망이 그것들이다[8-11]. 베니쉬 망의 경우는 두 개의 벤안 망들을 망의 가운데 스위칭 단계에서 상호 대칭되게 연결한 것으로, 중간 단계의 공유를 통해 다중 경로들을 제공한다. 그러나, 중간 단계 이후에는 유일한 경로만이 존재하여, 결합 감내성이 없는 단점을 지닌다[8]. 클로스 망은 전화 교환기와 다중 처리기 상호연결, 데이터 통신에 널리 사용되어 왔다[9]. 이 망 역시 중간 단계 뒤로는 유일한 경로만이 있어, 첫 단계에서만 결합 감내성을 제공한다. 다중/병렬 스위칭 망은 추가적인 스위치 판들을 사용하여, 입 출력 단들 사이에 추가한 판들의 수 만큼의 다중 경로들을 제공한다. 그러나, 이 방법 또한 첫 번째 단계에서만 결합 감내성을 제공한다. Itoh의 망과 Hui 망[10]은 다중 경로들을 제공하나, 다른 종류의 단위 스위치들을 사용하여 단위 모듈로의 구성이 불가능하고, 또한 망의 구조도 복잡하다[8].

많은 다단 스위칭 망들이 추상 대수학 관점에서 Cayley Graph[12]라는 사실이 알려져 있으며[13], 이러한 사실은 스위치들의 경로 제어에 응용되어 왔고, 또한 스위칭 망의 설계에 이론적 기반이 되었다[2,13]. 본 논문에서는 먼저 연결들이 추가된, 확장 벤안 망의 위상적 특성들을 추상 대수학 관점에서 분석한 결과를 사용하여, 고성능 결합감내 스위칭 망을 설계하여 제시한다. 제시된 망은, 벤안 망의 장점인 일반성과 자기 경로제어의 간단함을 유지함과 동시에, 한 종류의 단위 스위치를 사용하고, 적은 하드웨어 비용과 간단한 자기 경로제어 방법을 사용하여, 스위칭 망 내부의 모든 링크들을 이용하여 결합 감내성을 제공할 수 있다. 또한, 이 스위칭 망의 성능을 시뮬레이션을 사용하여 분석하여, 비균일 트래픽 하에서 기존의 스위칭 망들 보다 우수함을 보인다.

스위칭 망이 결합감내성을 갖게하기 위해서는 결합 감지와 결합 위치 추적이 선행되어야 한다[14,15]. 또한 결합 감지와 결합 위치 추적은 센서 망들의 제어와 유지를 위해 요구되는 것과 같은 복잡한 디지털 장비들을 위해서는 중요하다[1]. 많은 스위치들에 대해서 다양한 결합 진단법들이 제시되어 있으나[14,15], 다중 경로들을 제공하는 결합감내 스위칭 망들은 다양한 방법으로 다중 경로를 제공하기 때문에, 이들 스위칭 망들을 위한 일반화된 결합 진단법은 없다[3]. 본 논문에서는 제시한

결합감내 스위칭 망을 위한 결합 진단법을 제시한다.

2절에서 링크들이 추가된 확장 벤안 망의 위상적 특성을 추상 대수학을 도입하여 분석한 결과를 제시 한다. 3절에서는 2차원 링-벤안 망을 제시한다. 그리고 이 망의 성능을 분석한다. 4절에서는 이들 스위칭 망들의 결합 진단법을 제시한다. 끝으로 5절에서 결론을 맺는다.

2. 링크들이 추가된 확장 벤안 망의 위상적 특성 분석

2.1 확장 벤안 망의 위상적 특성

본 절의 마지막 정리를 제외한 대부분의 내용은 [2]의 논문에 있는 결과와 거의 동일하나, 본 논문의 완전성을 위해 기술하였다. 본 논문에서는 C. Wu[16]의 명명법(naming scheme)을 벤안 망의 형상을 기술하기 위해서 사용한다. 각 스위칭 단계는 첫 단계를 1로 시작하여, 연속으로 $\log_2 N$ 까지 번호를 붙여 표현한다. N 개의 입 출력 링크들은 $\log_2 N$ 자리수의 이진수로 번호를 붙여 표현한다. 즉 $link(p_{\log_2 N}, p_{(\log_2 N)-1}, \dots, p_1)$ 와 같이 표현한다. 각 스위칭 단계에서, 단위 스위치(Switching Element, SE)는 $(\log_2 N)-1$ 자리수의 이진수들로, $(p_{(\log_2 N)-1}, p_{(\log_2 N)-2}, \dots, p_1)$, 표현되는데, 이는 위로부터 시작하여, 스위칭 단계 내에서의 상대적 위치를 이진수로 표현한 것이며, 레벨(level)이라고도 부른다. 입력 셀의 목적 주소는 $A=(a_1, a_2, \dots, a_{\log_2 N})$ 로 표현된다. 그러면, 벤안 망안 단위 스위치들은 다음과 같이 정의된다.

정의 1 벤안 망의 각 출력 링크에 대한 위상 기술방법은 다음과 같다[2,16].

$$\beta_0[(p_i, p_{i-1}, \dots, p_1)_i] = (p_{i-1}, p_{i-2}, \dots, p_1, 0)_{i-1}, \quad (1)$$

$link(p_i, p_{i-1}, \dots, p_1, 0)_i$ 로 연결

$$\beta_l[(p_i, p_{i-1}, \dots, p_1)_i] = (p_{i-1}, p_{i-2}, \dots, p_1, 1)_{i-1}, \quad (2)$$

$link(p_i, p_{i-1}, \dots, p_1, 1)_i$ 로 연결

여기서 $1 \leq i \leq (\log_2 N) - 1$ 이다. 그리고 $l = (\log_2 N) - 1$ 이다. □

식 (1)과 (2)의 연산 β_i 는 단계 i 의 한 SE로부터 단계 $i+1$ 의 두 SE들로의 사상(mapping)으로 링크를 표현한다. 연산 β_0 는 SE의 상위 출력 링크를 통해서 도달 가능한 SE를 기술하기 위해서 사용하고, 연산 β_1 은 하위 출력 링크를 위해서 사용한다. 이제 SE와 링크를 기술하기 위한 약식 기호를 다음과 같이 정의한다.

정의 2 기호 $n_{i,j}$ 는 단계 i , 레벨 j 의 SE이다. 여기서 $1 \leq i \leq \log_2 N$ 이고 $0 \leq j < N/2$ 이다.

다음은 벤안 망의 각 단계의 단위 스위치들 간에 동치관계(equivalence relation)가 있음을 보인다.

정의 3 $R(n_{i,j})$ 는 벤안 망에서 자기 경로제어 함수 a_i

에 모든 가능한 주소들을 적용 시켰을 때, SE n_{ij} 로부터 도달 가능한 마지막 단계의, 즉 단계 $\log_2 N$ 의, 출력 링크들의 집합이다. 여기서 $a_i[(p_i, p_{i-1}, \dots, p_1)_i, (a_i, a_2, \dots, a_{i-1})] = (p_{i-1}, p_{i-2}, \dots, p_1, a_i)_{i-1}$ 이고, 이 경우 $link(p_i, p_{i-1}, \dots, p_1, a_i)_i$ 로 연결되고, $(a_i, a_2, \dots, a_{i-1})_i$ 는 각 셀의 주소이다. 다시 말해 라우팅 함수 a_i 는 한 셀이 특정 단계의 한 SE의 입력 링크에 도착 했을 때, 출력 링크를 통해서 다음 단계 $i+1$ 의 한 SE로 셀을 보내기 위해서 사용된다.

이제 한 단계에서의 모든 SE들의 집합에 관한 라우팅 측면에서의 동치 관계를 정의하자.

정의 4 단계 i 의 SE들의 집합 \mathcal{N}_i 에서 정의되는 관계 \sim 는 데카르트 곱(Cartesian Product) $\mathcal{N}_i \times \mathcal{N}_i$ 중 다음과 같은 속성을 갖는 부분 집합이다.

$$n_{ij} \sim n_{ik} \Leftrightarrow R(n_{ij}) = R(n_{ik}).$$

보조정리 1 집합 \mathcal{N}_i 에서 정의된 관계 \sim 는 동치관계(Equivalence Relation)이다.

정의 5 정의된 관계 \sim 와 SE n_{ij} 에 대해, 동치류(Equivalence Class) $[n_{ij}]_{\sim}$ 는, n_{ij} 에 의해서 결정되는, 다음과 같은 속성을 갖는 부분 집합이다.

$$[n_{ij}]_{\sim} = \{n_{ik} \mid n_{ij} \sim n_{ik}, \forall 0 \leq k < N/2\} \quad \square$$

이제 이 동치 부류에 의해서 유도되는 동치 부류들 나타내기 위해 “/” 표기법을 정의하자.

정의 6 벤안 망의 단계 i 에서, 관계 \sim 에 의해 유도되는 동치류들은 “/” 표기법을 사용하여 다음과 같이 정의된다.

$$\mathcal{N}_i / \sim = \{[n_{ij}]_{\sim} \mid n_{ij} \in \mathcal{N}_i, \forall 0 \leq j < N/2\} \quad \square$$

이제 링크들을 추가한 확장 벤안 망의 위상과 자기 경로제어 알고리즘을 해석하는데 유용한 속성들을 증명할 수 있다.

정리 1 단계 i 의 한 동치부류에 속하는 SE들은 그들의 SE 번호 $(p_{i-1}, \dots, p_1, d_i, d_2, \dots, d_{i-1})_i$ 의 접미사(suffix)가 동일한 이진수 연속 “ d_i, d_2, \dots, d_{i-1} ”을 갖는다. (단, $1 < i \leq \log_2 N$) $i = 1$ 일때, 즉, 첫번째 단계에서, 모든 SE들은 하나의 동치부류에 속한다.

증명: 각 단계에 대한 수학적 귀납법으로 간단히 증명된다[2,3,5,6]. \square

다음의 따름 정리는 단 안에서의 한 동치 클래스의 SE들 간의 위상적 거리를 표현한다.

따름정리 1 단계 i 안에서의 한 동치 클래스 안에 있는 인접한 두 SE들 간의 위상적 거리는 2^{i-1} 이다: 즉

$$n_{ij} \sim n_{ik} \Leftrightarrow |j-k| = 2^{i-1} \times l,$$

여기서 $l \in \{0, 1, \dots, N/2^i\}$.

증명: 정리 1에 따라 증명됨. \square

다음과 같이 우리는 단계 i 에서 2^{i-1} 개의 서로 다른 종류의 단위 스위치들이 있음을 알 수 있다.

따름정리 2 단계 i 에서의 동치 부류들의 차수는 2^{i-1}

이다: $|N_i / \sim| = 2^{i-1}$

증명: 정리 1에 따라 증명됨. \square

따름 정리 1과 따름정리 2로부터, 다른 종류의 단위 스위치들이 하나의 스위칭 단계 내에 일정한 배열로 놓여 있음을 알 수 있다. 이제까지 벤안 망의 특성들을 위상과 자기 경로제어 관점에서 해석하였다. 이제 동일한 단 내에서의 단위 스위치들 간의 상대적 위치를 명확히 표현하기 위해, 다음과 같이 함수 γ_k 를 정의한다.

정의 7 확장 벤안 망에서 한 단계 내의 한 SE로부터 다른 SE의 상대적 위치를 표현하기 위한 대수적 기술 방법은 다음과 같다[2].

$$v_k[n_{ij}] = n_{i,(j+k) \bmod (N/2)}$$

$$v_{-k}[n_{ij}] = n_{i,(j+N/2-k) \bmod (N/2)} = v_{N/2-k}[n_{ij}],$$

여기서 $1 \leq k \leq N/2$.

만약 스위칭 단계 내에서 SE들 간에, 한 SE n_{ij} 로부터 다른 SE $v_k[n_{ij}]$ 와 또다른 SE $v_{-k}[n_{ij}]$ 로의 경로들을 제공하는 상호연결을 만들면, 앞서 보인 성질들과 다음에 제시될 성질들을 이용하여, 추가된 링크들 뿐만 아니라, 기존의 모든 출력 링크들을 사용하는 결합감내 스위칭 망들과 적용 경로제어들을 제공할 수 있다. 다음의 정리와 따름정리들은 제시할 결합감내 스위칭 망들과 적용 경로제어 알고리즘들의 기본 바탕이 된다.

따름정리 3 확장 벤안 망에서의 하나의 출력 링크로 시작되는 스위칭 경로는, 동치인 단위 스위치의 출력 링크로 시작되는 다른 스위칭 경로로 대체될 수 있다.

$$\begin{aligned} \beta_k[n_{ij}] &\sim \beta_k[v_2^{j-1}[n_{ij}]] \\ &\sim \beta_k[v_{2^{j-1}}[n_{ij}]] \end{aligned}$$

여기서 $k \in \{0, 1\}$.

증명: 정의 7과 정리 1, 따름정리 1과 2에 의해서 증명된다. \square

다음의 따름정리는, 만약 스위칭 단계 내에서 SE들 간에 상호 연결을 만들면, 즉 한 SE n_{ij} 로부터 다른 한 SE $\gamma_k[n_{ij}]$ 로의 경로들을 위한 상호연결을 만들면, 한 출력 링크로 시작되는 경로를 동일한 SE의 다른 출력 링크로 시작되는 경로로 대체할 수 있음을 보이고 있다.

따름정리 4

$$v_1[\beta_l[n_{ij}]] = \beta_l[n_{ij}] \text{ (정의 1과 7에 의해서)}$$

$$\gamma_{2^{i-1}}[\beta_l[n_{ij}]] = \gamma_{2^{i-1}}[v_1[\beta_l[n_{ij}]]] \text{ (위의 등식)}$$

$$\sim \beta_l[n_{ij}] \text{ (정의 7와 따름정리 1과 2에 의해서)}$$

$$v_{-1}[\beta_l[n_{ij}]] = \beta_l[n_{ij}] \text{ (정의 1과 7)}$$

$$\gamma_{-(2^{i-1})}[\beta_l[n_{ij}]] = \gamma_{-(2^{i-1})}[v_{-1}[\beta_l[n_{ij}]]] \text{ (위의 등식)}$$

$$\sim \beta_l[n_{ij}] \text{ (정의 7와 따름정리 1과 2에 의해서)}$$

여기서 $1 \leq i < \log_2 N$.

증명: 정의 1과 7 그리고 따름정리 1과 2에 의해서 증명된다. \square

다음 정리에서는, 하나의 스위칭 단계에서의 보정 라우팅이 후속 스위칭 단계들에서의 보정 라우팅으로 대치될 수 있음을 보인다. 다시 말하면, 하나의 셀이 동일한 스위칭 단계 내의 원래 중간 기착지가 되는 단위스위치로부터 일정 거리 떨어진 단위스위치에게로 편향 라우팅 되었다면, 이 편향 라우팅된 셀은 그 단계에서 편향 라우팅 된 것을 바로잡을 수도 있지만, 이것이 여의치 않으면, 후속 스위칭 단계에서 이전 단계의 두 배의 거리에 해당하는 레벨이 떨어진 SE로의 보정 라우팅에 의해서 바로잡을 수 있음을 보인다.

정 리 2 만약 함수 γ_k 에 해당하는 보정 라우팅 혹은 편향 라우팅을 할수 있는 상호 연결을 제공하면, 원래 단위 스위치로부터 k 레벨 떨어진 단위 스위치로 이동한 후, 그 단위 스위치의 출력 링크로 시작되는 경로는, 원래 단위 스위치의 출력 링크로 시작되어, 다음 단계에서 $2k$ 레벨 떨어진 단위 스위치로 이동하는 경로로 대체될 수 있다. 즉

$$\beta[\nu_k[(p_i, p_{i-1}, \dots, p_1):i]] = \nu_{k \times 2}[\beta[(p_i, p_{i-1}, \dots, p_1):i]]$$

여기서 $1 \leq i < \log_2 N$, $j \in \{0, 1\}$, 그리고 $k \in \mathbb{Z}$.

증 명: 각 단계에 대한 수학적 귀납법으로 증명된다 [2,3,5,6]. □

다음 정리들에서는, 각 스위칭 단계에서의 단위 스위치들의 배열을 분석하여, 각 단계의 스위치들 간에 그리고 단계들 사이에 유용한 다양한 성질들이 있음을 추상대수학 관점에서 기술한다. 먼저 다음 정리에서는 각 스위칭 단계의 단위 스위치들이 하나의 순환 군으로 구성되었음을 보인다.

정 리 3 대수 G_i 를 집합 $\{n_{i,j} \mid \exists n_{i,j} \in [n_{i,j}] \cdot \forall [n_{i,j}] \in \mathbb{N}/\sim\}$ 의 연산자 ν_i 하에서의 군으로 정의 하면, 대수 G_i 는 집합 $[n_{i,0}]$ 에 속하는 하나의 단위 스위치를 군 G_i 의 생성원 (Generator)으로 하여, 이 생성원에 연산자 ν_i 를 연속적으로 적용해서 만들어지는 순환 군 (Cyclic Group)[2,12]이다. 이 군의 각 요소들은, 라우팅 측면에서 단위 스위치의 논리적 항등성을 표현하는, 관계 \sim 로 구분된다[2].

그리고 따름정리 1과 2에 의하면, 벤안 망의 스위칭 단계 i 가 이러한 순환 군 G_i 의 규칙적인 나열들로 구성되어 있다. 또한 이 순환 군 G_i 의 차수 $|G_i|$ 는 2^{i-1} 이다. □

결과적으로, 위의 정리 3에 의거하여 보면, 따름 정리 1은 일반적인 순환 군의 핵심 특성을 보여주고 있다. 다음 정리 4는 단위 스위치들이 라우팅 측면에서 동치이면, 연산 β 나 연산 ν_k 그리고 혹은 두 연산들 모두 적용한 결과로 도달하는 단위 스위치들도 역시 동치임을 보인다. 따라서 관계 \sim 가 연산 β 와 연산 ν_k 에 대해 일종의 합동 (Congruence) 임을 보인다.

정 리 4 관계 \sim 는 β 와 ν_k 에 대해 다음 조건들을 만

족하는 일종의 합동 (Congruence)이다. i) 관계 \sim 는 동치 관계 이다. ii) 벤안 망의 모든 단위 스위치들의 집합 \mathbb{N} 의 임의의 모든 원소들 $n_{i,j}$ 와 $n_{i,k}$ 에 대해 다음 두 가지 성질들을 만족한다.

$$n_{i,j} \sim n_{i,k} \Leftrightarrow \beta_m[n_{i,j}] \sim \beta_m[n_{i,k}] \text{ 그리고 } n_{i,j} \sim n_{i,k} \Leftrightarrow \nu_m[n_{i,j}] \sim \nu_m[n_{i,k}] \text{이다.}$$

증 명: 정의 1과 4, 그리고 보조정리 1 및 정리 2에 의해 증명된다. □

정리 4에서 보여진 바와 같이, 동치 관계 \sim 를 가지는 두 단위 스위치들은, 링크 β 와 링크 ν_k 를 사용하는 라우팅 관점에서, 완전히 동일하다. 따라서 위의 정리 4는 동치인 단위 스위치들이 완전히 상호 대치적으로 사용할 수 있다는 사실을 보여주고 있다. 다음은 각 스위칭 단계의 순환 군들 간의 관계들의 성질들을 밝혀, 스위칭 망들을 이해하는데 유용한 성질들을 보여준다.

정 리 5 단계 i 의 순환 군 G_i 는 단계 $i+1$ 의 순환 군 G_{i+1} 의 부분군(subgroup)[12]이다. 그리고 연산 β 는 이웃하는 단계들의 순환 군 사이의 함수 ν_k 에 대한, 일종의 상동 관계를 만드는 군 준동형(Group Homomorphism)이다. 결과적으로 이웃하는 스위칭 단계들 G_i 와 G_{i+1} 으로 구성되는 팩터(Factor)군 G_{i+1}/G_i 가 존재하며, 이 팩터 군의 구성요소는 코셋(Coset) $\beta_0 G_i$ 와 $\beta_1 G_i$ 이다.

증 명: 정의 1과 7, 그리고 정리 2에 의해 증명된다. 다시 말해, 순환 군 G_{i+1} 의 부분 집합 G_i 는 연산 ν_k 에 대해 순환 군을 이루고 있으므로 부분군이다. 그리고 연산 β 는 정리 2에서 보인 바와 같이, $\beta[\nu_k[(p_i, p_{i-1}, \dots, p_1):i]] = \nu_{k \times 2}[\beta[(p_i, p_{i-1}, \dots, p_1):i]]$ 인 특성을 가지는 함수 ν_k 에 대한, 일종의 군 준동형 이다. 따라서 G_i 의 각 원소는 군 준동형 β 에 의해서 코셋 $\beta_0 G_i$ 와 $\beta_1 G_i$ 인 G_{i+1} 원소들과 사상된다. 따라서 팩터 군 G_{i+1}/G_i 가 존재한다. □

다음 절에서는 이러한 해석 결과들을 활용하여, 다음 절에서 상호 연결들 ν_1 과 ν_1 을 추가한 2-차원 링-벤안 망을 제시한다.

3. 고성능 결함감내 스위칭 망과 편향 자기 경로 제어

3.1 2-차원 링-벤안 스위치

$N \times N \times N$ 2-차원 링-벤안 망은 $N \times N$ 벤안 망에 다음과 같은 링크들을 추가해서 구성 할 수 있다.

정 의 8 2-차원 링-벤안 망을 구성하기 위해, 벤안 망에 추가하는 링크들을 기술 방법은 다음과 같다.

$$\gamma_1[n_{i,j}] = n_{i,(j+1) \bmod (N/2)}, \text{ 그리고}$$

$$\gamma_{-1}[n_{i,j}] = n_{i,(j-1+2^{i-1}) \bmod (2^{i-1})}$$

여기서 $1 \leq i \leq \log_2 N$ 그리고 $1 \leq j \leq N/2$ 이다. □

셀들의 경로제어는, 목적지 주소를 사용하여, 2차원

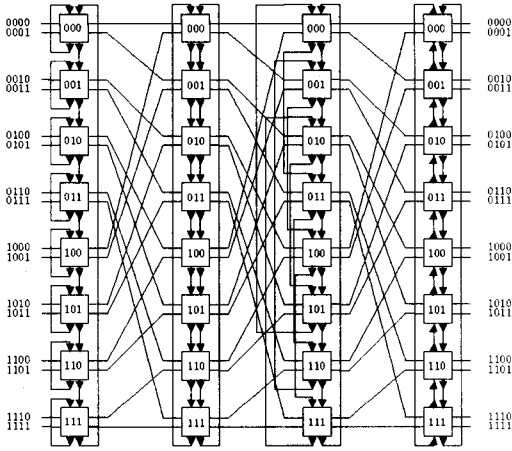


그림 1 16×16 2-차원 링-벤안 망

링-벤안 망의 각 SE에서 지역적으로 이루어진다. 제한된 스위칭 망에서는 목적지 주소에 추가하여, $\log_2 N$ 비트들 크기의 이탈 꼬리표(Deviation Tag) k 가 사용된다. 결과적으로 각 셀의 헤더에 저장되는 목적지 주소는 (A, k) 쌍으로 표현된다. 그리고 단계 1의 입력 링크에 한 셀이 도착했을 때, k 값은 0으로 설정된다. 즉 행선지 주소는 $(A, 0)$ 이다. 이탈 꼬리표 k 의 값은 각 스위칭 단계에서, 셀이 실제 도달한 SE가 원래 중간 기착지인 SE, 혹은 이것의 동치 SE로부터 얼마 만큼 떨어져 있는지 나타낸다. 각 SE에서 갱신될 k 값은 k 의 현재 값과 선택된 링크 그리고 원래 출력하려던 링크를 가지고 다음에 정의된 방법으로 계산한다.

정의 9 2차원 링-벤안 망의 각 SE의 적응 자기 경로 제어 알고리즘은 다음과 같다.

(여기서 $s \in \{0, 1\}$ 이고, i 는 해당 SE의 스위칭 단계의 번호이다.)

각 입력 셀에 대하여,

1. $k = 0$ 인 경우,
 - (a) $\beta_s[\cdot]$ ($= \alpha[\cdot]$)로 보낸다.
 - (b) 만약 실패하면, $\beta_s[\cdot]$ ($\neq \alpha[\cdot]$)로 보낸다.
 - (c) 만약 실패하면, $v_{-1}[\cdot]$ 로 보낸다,
 - (d) 만약 실패하면, $v_1[\cdot]$ 로 보낸다.
2. $k \neq 0$ 인 경우,
 - (1) $v_{-1}[\cdot]$ 로 보낸다,
 - (2) 만약 실패하면, $v_1[\cdot]$ 로 보낸다,
 - (3) 만약 실패하면, $\beta_1[\cdot]$ 로 보낸다,
 - (4) 만약 실패하면, $\beta_0[\cdot]$ 로 보낸다.

k 를 수정하는 규칙은 다음과 같다.

1. $k = 0$ 일 때,
 - (1) 만약 $\beta_0[\cdot] = \alpha[\cdot]$ 그리고 $\beta_1[\cdot]$ 가 선택되었다면, $k \leftarrow 2^i - 1$.

- (2) 만약 $\beta_1[\cdot] = \alpha[\cdot]$ 그리고 $\beta_0[\cdot]$ 가 선택되었다면, $k \leftarrow 1$.
- (3) 만약 $v_1[\cdot]$ 가 선택되었다면, $k \leftarrow 2^{i-1}$.
- (4) 만약 $v_{-1}[\cdot]$ 가 선택되었다면, $k \leftarrow 1$.

2. $k \neq 0$ 일 때,

- (1) $\beta_0[\cdot] = \alpha[\cdot]$ 그리고 $\beta_1[\cdot]$ 가 선택되었다면, $k \leftarrow k \times 2 - 1$.
- (2) 만약 $\beta_1[\cdot] = \alpha[\cdot]$ 그리고 $\beta_0[\cdot]$ 가 선택되었다면, $k \leftarrow k \times 2 + 1$.
- (3) 만약 $\beta_j[\cdot] = \alpha[\cdot]$ 그리고 $\beta_{1-j}[\cdot]$ 가 선택되었다면, $k \leftarrow k \times 2$, 여기서, $j \in \{0, 1\}$.
- (4) 만약 $v_1[\cdot]$ 가 선택되었다면, $k \leftarrow k - 1$.
- (5) 만약 $v_{-1}[\cdot]$ 가 선택되었다면, $k \leftarrow (k + 1) \bmod 2^{i-1}$.

이러한 적응 자기 경로 제어 알고리즘은 할당된 링크에 결합이 발생하거나, 셀들의 충돌이 발생하는 경우에 해당 링크를 우회하는 경로를 만들기 위해 사용한다. 다음에서는 2차원 링-벤안 망을 위한, 적응 자기 경로 제어 알고리즘의 정당성을 증명한다.

정리 6 목적지인 마지막 단계의 출력 정합으로, 입력된 셀을 올바르게 내보내기 위해서, 마지막 단계의 SE들을 제외한, 2차원 링-벤안 망의 모든 SE들은 모든 링크들을 대체 경로들로 사용하여 셀을 보낼 수 있다.

증명: 따름정리 4에 의해, 최종 출력 정합으로 셀을 보내기 위해, 출력 링크 대신에 다른 출력 링크를 사용할 수 있음을 알 수 있다. 따름정리 3에 의해, 출력 링크 대신에 추가한 링크를 사용할 수 있음을 알 수 있다. 정리 2에 의해, 추가된 링크 대신에 출력 링크를 사용할 수 있음을 알 수 있다. 따라서 증명되었다. □

정리 7 2차원 링-벤안 망의 경로 제어 알고리즘은 임의의 입력 셀을 그의 목적지인 출력 정합에 올바르게 보낸다.

증명: 먼저, 본 경로 제어 알고리즘은 SE의 가용한 링크를 할당한다. 이 링크 할당의 정당성은 정리 6에 의해서 증명된다.

두번째로, k 의 수정 규칙은 다음과 같이 증명된다.

1. 규칙 1-(1)은 따름정리 4의 (6)항에 의해서 증명된다. 규칙 1-(2)는 따름정리 4의 (5)항에 의해서 증명된다. 그리고 규칙 1-(3)은 따름정리 4의 (6)항과 정의 10에 의해서 증명된다.
2. 규칙 2-(1)은 따름정리 4의 (6)항과 정리 2에 의해서 증명된다. 규칙 2-(2)는 따름정리 4의 (5)항과 정리 2에 의해서 증명된다. 그리고 규칙 2-(3)는 정리 2에 의해서 증명된다.
3. k 는 현 단계에서 추가된 링크들을 통해서 보정 경로 제어가 필요한 횟수를 의미한다. 따라서 규칙 2-(4)는

증명된다.

4. 규칙 2-(5)은 따름정리 1과 2와 정리 3에 의해서 증명된다.

따라서, k 를 유지하기 위해 본 수정 규칙들을 사용하는, 제시된 경로제어 알고리즘은 셀을 마지막 단계의 최종 출력 정합에 올바르게 내보낸다. 따라서, 이 경로제어 알고리즘은 올바르다. □

추상 대수학의 해석 관점에서, 앞서 제시한 결함감내 망과 자기 경로제어를 살펴보면 다음과 같이 정리할 수 있다. 결함들을 우회하기 위해 셀들은 편향 라우팅을 하며, 결함감내 스위칭 망을 통과하여 목적지에 도달한다. 그림 2는 이러한 편향 셀 스위칭의 개념을 도시한다. 이 그림에서 각 타원은 각 스위칭 단계를 나타내고, 타원에 속한 실선은 해당 단계내의 순환 균을 나타낸다. 하나의 순환 균으로부터, 다음 스위칭 단계에 있는 그것의 수퍼 균으로 연결한 단방향의 화살표는 스위칭 단계간의 라우팅인 β_j 를 나타낸다. 순환 균들 상에서의 양방향 화살표는 스위칭 단계 안에서의 가능한 라우팅 γ_k 를 도시하고 있다. 각 타원 위의 숫자는 64 X 64 확장 베안 망의 각 단계의 순환 균의 기본 스위치들의 차수를 나타내고 있다.

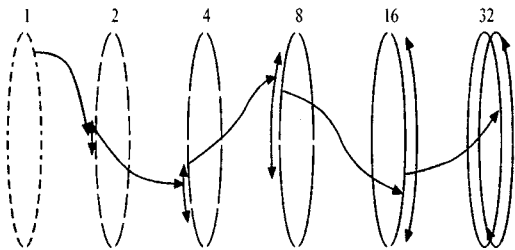


그림 2 순환 균들과 준동형 β_j 그리고, 완전 적응 자기 경로제어[2]

3.2 성능 분석

본 절에서는 2-차원 링-베니안 망을 균일 (Uniform) 및 비균일 (Nonuniform) 트래픽 하에서 분석한다. 성능 분석을 위해서, 우리는 다음과 같은 일반적인 가정 하에 시뮬레이션을 행하였다.

- N 개의 근원들은 셀들을 비율 λ 의 포아송 확률과정에 따라서 생성한다. (여기서 $0 \leq \lambda \leq 1$)
- 각 셀의 목적지는 각 시뮬레이션 경우에 따라 0 부터 $N - 1$ 사이의 수를 균일 분포 또는 비균일 분포로 생성하여 설정한다.
- 하나의 링크에서 결함이 발생하거나, 셀들 간에 충돌이 있으면, 하나의 셀이 임의로 선택되어 링크로 보내지고, 다른 셀들은 다른 링크들로 우회되어 진다.

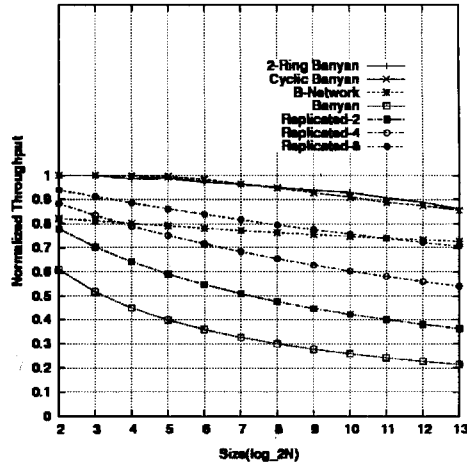


그림 3 균일 트래픽하에서의 2-차원 링-베안 망과 시클릭 베안 망, B-network, 베안 망, 중복 베안 망들의 망 크기의 변화에 대한 정규화된 통과율

• 통과율과 지연시간은 각 출력 포트에서 측정되어지고, 시뮬레이션의 시간은 정규화된 통과율과 정규화된 지연시간을 얻는때까지 진행된다.

먼저 균일한 트래픽을 최대로 부가할 경우에 있어, 즉 $\lambda = 1.0$ 를 부가 하였을 경우에 있어, 여러 스위칭 망들의 망 크기 변화에 대한 정규화된 통과율을 살펴보자. 그림 3에 보인 바와 같이, 1024 X 1024 2-차원 링 베니안 네트워크의 통과율은 일반적인 베니안 네트워크의 3.51배, 중복-2 베니안 네트워크의 2.15배가 되고, 또한 중복-4 베니안 네트워크의 1.51배, 그리고 중복-8 베니안 네트워크의 1.20배이다. 사이클릭 베안 망과 좀더 상세히 비교해 볼 경우, 1024 X 1024 스위칭 망은 0.02 배의 성능 증가를 보였고, 256 X 256 스위칭 망은 동일한 통과율을 보였으며, 이보다 작은 크기의 64 X 64 스위칭 망은 0.01 배의 성능의 감소를 보였다. 이 분석 결과들을 최근 연구된 다른 스위칭 망 [11]과 비교한 결과, 제시된 망의 성능이 완전 체인된 감마 상호연결망[11]보다도 우수함을 알 수 있었다.

비균일 트래픽은 $N \times N$ 부하 행렬 $D = \{\lambda_{ij}\}$ 로 나타낼 수 있는데, 여기서 λ_{ij} 는 출력 포트 j 가 목적지인 하나의 셀이 입력 포트 i 에 도달할 확률을 의미한다. 따라서, 행렬의 제 i 행의 합은 입력 포트 i 에 부가되는 전체 부하를 나타내고, 제 j 열의 합은 출력 포트 j 에 부가되는 총 입력 부하를 나타낸다. 이러한 비균일 트래픽 패턴들은 그 가짓수가 무한대이다.

이러한 패턴들 중 실제적인 트래픽 패턴들을 대표하는 Hot-group Model [2]이라고 하는 특정 비균일 트래픽 패턴을 사용한다. Hot-group Model의 입력 셀들은

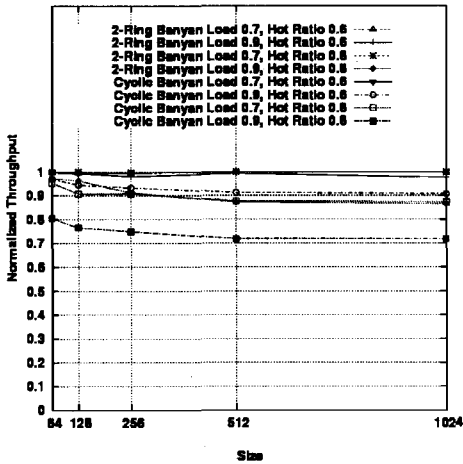


그림 4 비균일 트래픽하에서의 2-차원 링-벤안 망과 사이클릭 벤안 망의 망 크기의 변화에 대한 정규화된 통과율

모든 출력 포트들에 다음과 같이 비균일적으로 분포한다. 즉 출력 포트는 “격렬한 출력 집단”과 “대체적으로 쉬는 출력 집단”의 두개의 군들로 나뉜다. 부하 행렬 D 는 $D = [D_h(\lambda_h) \ D_c(\lambda_c)]$ 로 나뉜다. D_h 의 행의 합은 λ_h 이고 D_c 의 행의 합은 λ_c 이다. 여기서 $\lambda_h + \lambda_c = \lambda$ 이다. 다른말로 하면, 동일한 크기의 두개의 출력 포트 집단이 있는데, 셀들이 목적지 집단 D_h 로 가는 확률은 λ_h 이고, 목적지 집단 D_c 로 갈 확률은 λ_c 이다. Hot Ratio를 r 이라고 정의하면, $\lambda_h = r\lambda$ 이고, $\lambda_c = (1-r)\lambda$ 이다. 여기서 r 은 $0.5 \leq r \leq 1.0$ 이다.

이제 비균일 트래픽 하에서의 2-차원 링 벤안 망의 사이클릭 벤안 망 대비 성능을 상세히 살펴보자. 그림 4에 보인 바와 같이, 2-차원 링-벤안 망에 입력 부하 $\lambda = 0.9$ 를 부가하고, Hot Ratio r 을 0.6으로 설정하는 경우, 512×512 망의 통과율은 사이클릭 벤안 망에 비해 8.7% 우수하다. 그리고 Hot Ratio를 0.8로 설정하는 경우, 통과율은 사이클릭 벤안 망 대비 21.1% 더 우수하다. 그리고, 제안된 스위칭 망에 입력 부하 $\lambda = 0.7$ 를 부가하고, Hot Ratio r 을 0.8으로 하였을 경우, 512×512 망의 통과율은 사이클릭 벤안 망 대비 14%가 더 우수하다. 1024×1024 2-차원 링-벤안 망에 입력 부하 $\lambda = 0.9$ 를 부가하고, Hot Ratio를 0.8로 하였을 경우, 통과율은 사이클릭 벤안 망 대비 20.4% 우수하다. Hot Ratio r 을 0.6으로 설정하였을 경우, 통과율은 7.6% 우수하다. 그런데, Hot Ratio는 인터넷 트래픽이 스위칭 망에 유입되는 경우 발생시키는 공간적인 혼잡 정도와 같은 트래픽 주소들의 비균일 정도를 표현한다. 그리고, 제안된 스위칭 망은 다른 스위칭 망과 상대적으로

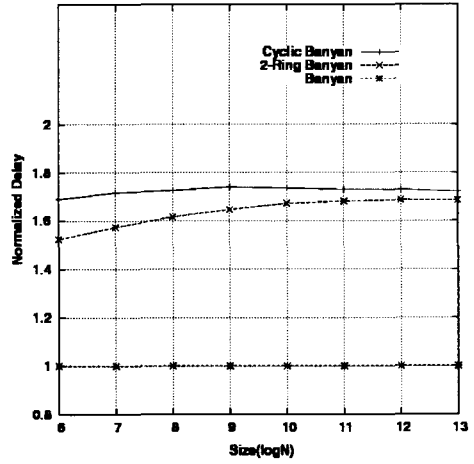


그림 5 균일 트래픽하에서의 2-차원 링-벤안 망과 사이클릭 벤안 망의 망 크기의 변화에 대한 정규화된 지연율

로 비교하여 Hot Ratio가 더 높은 경우 더욱 좋은 성능을 보인다. 따라서 제안된 스위칭 망은 비균일 트래픽을 스위칭하기에 사이클릭 벤안 망 보다 더 적합하다고 할 수 있다.

그림 5에서는 입력 부하를 최대도 부가한 경우에, $\lambda = 1.0$ 의 경우에, 스위칭 망의 크기 변화에 대한 스위칭 단계들의 갯수로 정규화된 평균 지연을 보인다. 이 그림에서 보는 바와 같이, 정규화된 지연은 망의 크기에 따라, 일반적인 베니안 네트워크의 1.5배에서 1.7배의 크기를 가진다. 사이클릭 벤안 망과 비교한 경우, 2-차원 링-벤안 망이 정규 지연 측면에서 약간 우수함을 보이고 있다. 따라서 결과적으로 스위칭 망의 전체 스위칭 단계들의 수의 1.7 배의 지연 이내에 셀들이 스위칭 됨을 알 수 있다.

그림 6에서는 비균일 트래픽 하에서의 2-차원 링-벤안 망과 사이클릭 벤안 망의 셀 지연 시간의 분포를 보여주고 있다. 다양한 크기의 스위칭 망에 대해, 부하 0.7와 Hot Ratio 0.8의 환경 하에서, 셀들이 스위칭 망을 통과하는 지연시간이 100 셀 이하임을 그림 6에서 알 수 있다. 또한 이 경우 셀 지연시간의 최대치가 사이클릭 벤안 망 보다 45% 정도 적음을 알 수 있었다. 더불어 제안된 스위칭 망의 순서의 무결성을 맞추기 위한 재배열 윈도우의 크기, 즉 셀이 스위칭 망을 떠나기 전에 반드시 지연되어야 하는 크기를 작은 크기로 유지할 수 있음으로써, 사이클릭 벤안 망과 동일한 방법으로, 즉 적은 하드웨어 비용으로, 효과적인 재배열 버퍼를 구성하여 사용할 수 있음을 알 수 있다.

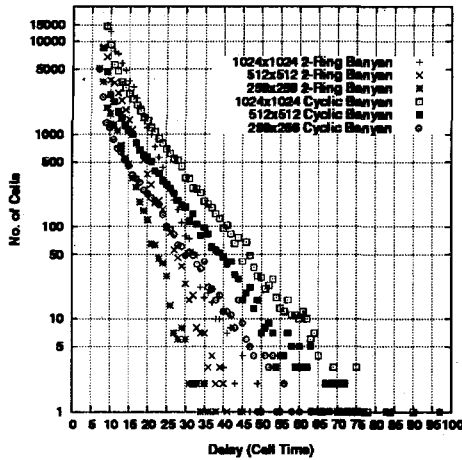


그림 6 부하 0.7 비균일을 0.8인 비균일 트래픽하에서의 2-차원 링-벤안 망과 사이클릭 벤안 망의 망 크기의 변화에 대한 지연 분포

3.3 신뢰성

본 절에서는 2-차원 링-벤안 망의 신뢰성에 대해 언급한다. 본 스위칭 망의 신뢰성은, 각 단위 스위치의 링크들의 수가 사이클릭 벤안 망과 동일하고, 모든 링크들이 우회 경로들을 만들기 위해서 사용이 가능하기 때문에, Park [6]의 연구에 언급된 사이클릭 벤안 망과 신뢰성 분석 측면에서 동일하다. 따라서 Park의 신뢰성 계산 공식에 따라 신뢰성을 계산하고, Hui [10]의 연구 결과를 종합하여, 표 1에 보인 바와 같이 망들의 상대적인 신뢰성을 평가할 수 있다. 이 표에서 신뢰성의 척도로 사용하는 스위칭 망의 고장을 초래하는 결함 요소들의 기대값 \bar{k} 는 i 번째 결함이 스위칭 망의 고장을 초래할 확률 $\mu(i)$ 를 가지고 다음과 같이 계산한다[6].

$$\bar{k} = \sum_{i=1}^B i\mu(i),$$

여기서 B 는 스위칭 망 전체의 링크들의 갯수이고[6], $\mu(i)$ 는 [6]에서 제시한 식들을 바로 그대로 사용하여 구할 수 있다. 이 표에 나타난 바와 같이, 제시된 스위칭 망이 벤안 망에 비해서는 64 X 64 스위칭 망의 경우 58.3 배, 최근에 제시된 Hui[10]의 완전 체인된 감마 상

호연결망 보다, 16 X 16 망은 27.5%, 64 X 64 망은 51.0% 신뢰성이 높아짐을 알 수 있다.

4. 결함 진단법

본 절에서는 앞 절에서 제시한 결함감내 스위칭 망들의 결함 진단법을 제시한다. 결함 진단은 결함감내를 위해 반드시 선행하여 해결해야 하는 문제이다. 본 절에서는 먼저 결함 모델을 제시하고, 본 모델을 사용하여, 결함 진단 방법을 제시한다. 결함 진단은 결함 감지와 결함 위치 검출로 구성된다. 본 절에서는 제시한 결함감내 스위칭 망들 내에서 셀들을 전달함과 동시에 결함을 감지하는 병행적 결함 감지 방법[14]을 간략히 설명하고, 순차적인 결함 감지와 이에 따른 정확한 위치 검출 방법을 제시한다.

4.1 결함 모델

다단 스위칭 망의 결함들은 두개의 부류, 즉 링크들의 결함과 단위 스위치들의 결함으로 분류된다. 결함들은 논리회로 안에서 보다, 집적회로의 단자에서 더 자주 일어나고[17,18], 고장은 하나의 결함에서 유발되는 경우가 여러 결함들에 의해 유발되는 경우보다 많다[3]. 따라서 우리는 결함이 링크에서 발생하는 경우에 국한하여, 논의를 진행하며, 특히 결함 위치 검출을 위해서는 하나의 링크의 결함을 가정한다.

분산 제어되는 다단 스위칭 망의 경우, 각 단위 스위치는 데이터 링크들과 프로토콜 링크들을 가진다[19]. 따라서 각 단위 스위치에서는 다음과 같이 두가지 종류의 단일 점착 결함 (Single Stuck Fault)이 있다.

- 프로토콜 라인의 Stuck-At-a ($a \in \{0, 1\}$)
- 데이터 라인의 Stuck-At-a ($a \in \{0, 1\}$)

데이터 라인이 Stuck-At-a이면, 주소 정보를 포함한 모든 전달되는 정보는 완전히 파괴되고, 주소 정보가 모두 망가짐에 따라 잘못된 목적지에 전달될 것이다. 원천 지들과 목적지들 간에 경로를 설정하기 위해 사용하는 핸드셰이킹을 위한 프로토콜 링크의 결함은, 경로가 설정될 수 없도록 하거나, 한번 데이터의 전송이 시작된 후 경로의 설정을 고정(lockup)시켜 버리는 결과를 가져올 것이다.

표 1 2-차원 링-벤안 망과 Tzeng 망과 Hui 망의 망 크기의 변화에 대한 고장을 초래하는 결함 요소들의 기댓값들과 그들의 비교

N	$\bar{k}_{BanyanNetwork}$	$\bar{k}_{TzengNetwork}$	$\bar{k}_{HuiNetwork}$	$\bar{k}_{2-RingBanyan}$	$\frac{\bar{k}_{2-RingBanyan}}{\bar{k}_{HuiNetwork}}$	$\frac{\bar{k}_{2-RingBanyan}}{\bar{k}_{TzengNetwork}}$
4	1.0	4.5	6.2	4.7	0.758	1.044
16	1.0	11.5	17.1	21.8	1.275	1.896
64	1.0	27.2	38.6	58.3	1.510	2.143

4.2 관련된 작업들

다단 스위칭 망에서의 결합을 감지하는 것은 일반적으로 많은 시간을 필요로 한다[18,19]. 따라서 망의 크기와 무관한 횡수의 시험과 절차를 사용하여 결합을 감지하기 위한 방법들이 고안되어 왔다[19]. N 개의 입력을 가지는 일반적인 다단 스위칭 망의 링크 결합을 감지하기 위해, 모든 주소 조합의 셀들을 사용한다면, $N!$ 개의 입력 주소 패턴의 조합이 필요하며, 그림 7에서와 같이 두 비트의 워드를 시험 패턴으로 사용하는 방법은 총 2^N 개의 입출력 시험 패턴들의 조합을 발생시킨다[19]. 이 경우도 N 의 값이 커지면, 시험 입력들의 총 개수는 굉장히 많아지며, 이는 피할 수 없는 많은 시간을 필요로 한다. 따라서 발생 가능한 결합을 감지하고 결합 위치를 찾기 위해 필요한 시험 입력들의 수를 최소화하기 위한 효율적인 결합 진단 방법들이 고안되어 왔다[14,15,17-19]. 그런데 결합감내 스위칭 망들에 대한 결합 감지법은 결합감내를 위해서 가지는 다중 경로들 때문에 일반화된 방법이 존재하지 않는다. 본 절에서는 앞서 제시한 2-차원 링-벤안 망의 결합 진단 방법을 제시한다. 더불어 사이클릭-벤안 망의 결합 진단 방법을 제시한다.

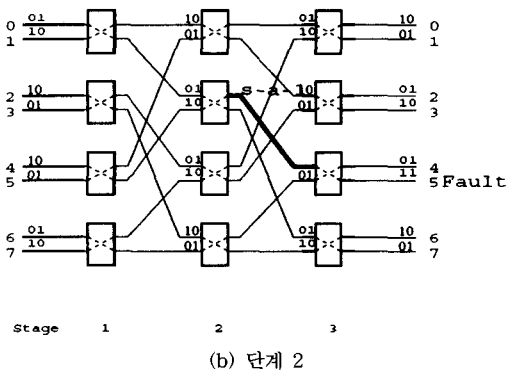
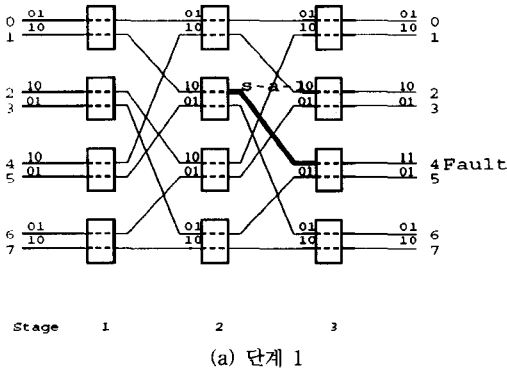


그림 7 하나의 출력 링크 점착 결합 위치 검출을 위한 입력 워드와 출력 워드들

4.3 2-차원 링-벤안 망과 사이클릭-벤안 망의 병행적 결합 진단법

셀들이 스위칭됨과 병행적으로 스위칭 망의 결합을 감지하는 방법은 다음과 같다. 셀을 전달하는 단위 스위치의 원천지에서, 기대한 프로토콜 신호가 수신이 않되면, 이는 셀이 전달이 않되었거나, 목적지인 단위 스위치에서 오류를 발견하는 경우를 의미한다. 여기서 오류란 패러티 오류가 발생한 것을 의미한다. 또한 일반적으로 이러한 오류의 검출을 위해 타이머의 도움을 받는다. 이러한 오류의 검출은 검출된 오류 링크의 상태를 결합 상태 설정하여, 정의 9로 제시된 편향 자기 경로제어 알고리즘의 링크의 할당에서 해당 링크를 배제시킨다. 이러한 결합 격리(Isolation)를 통해, 결합을 우회하는 대체 링크가 할당된다. 병행적 결합 진단을 사용하여, 단위 스위치에 붙어있는 링크들의 결합 그리고 이렇게 스위치의 동작 중에 결합이 감지되고, 그 감지 횡수가 다단 스위칭 망의 고장을 야기하는 고장 링크들의 기대치를 넘어서면, 스위칭 하드웨어의 교체를 위해, 결합 위치를 검출하기 위한 절차가 수행된다.

4.4 2-차원 링-벤안 망과 사이클릭-벤안 망의 순차적 결합 진단법

제시한 결합감내 스위칭 망들은 두가지 종류의 링크들, 즉 입출력 링크들과 추가된 링크들을 가지고 있다. 일반적인 입출력 링크들의 결합 진단을 위해서는 그림 7에 예시한 기존의 벤안 망을 위한 결합 진단법[19]을 사용한다. 그러나 추가된 링크들을 위해서는 새로운 결합 진단 방법이 추가적으로 요구된다.

기존의 출력 링크들의 결합 여부를 진단하기 위해서는, 그림 7에 보인바와 같이, 평행 연결 설정과 교차 연결 설정 상황을 야기하는 시험 셀들을 입력 포트들에 넣는 방법을 사용한다. 1단계에서는 셀의 라우팅 주소를 설정하여 모든 단위 스위치들을 평행 연결로 설정한다. 이 연결 상황에서 셀들의 전달 데이터로 두 비트의 상보적인 워드를 전달한다. 오류나 셀 미전달이 발생하지 않으면, 2번째 데이터에 다른 패러티를 갖도록 해서 전달하여 시험한다. 어떠한 라우팅 오류 혹은 셀 미전달이 발생하면, 곧바로 2 단계로 들어간다. 2단계에서는, 1단계에서 보낸 목적지 주소를 보수화하여 입력 포트에서 보내는데, 이는 모든 단위 스위치들을 교차 연결로 설정하게 된다. 설명한 두 시험 단계들에서 발견한 결합 경로들의 공통 링크가 결합이 있는 링크이다. 여기서 목적지 정합들은 셀의 목적지 주소를 확인하여, 잘못된 셀 라우팅을 찾고, 패러티 오류 또한 검사한다. 오류가 발생하지 않았으면, 원천지인 정합으로 프로토콜 신호를 보낸다. 진단 단계들에 걸쳐서, 원천지에서는 프로토콜 링크를 통해 되돌아오는 정보와 원천지의 타이머 정보를 종합하여 결합들

의 위치를 검출한다.

제안된 망의 추가된 링크들의 결합 여부를 진단하기 위해서는, 셀들이 모든 추가된 링크들을 통과하도록 하여야 한다. 다시 말해 그림 8과 그림 9와 같이 셀들의 충돌을 야기시켜, 편향 라우팅을 발생시킴으로써, 이들 충돌된 셀들을 사용하여, 스위칭 단계별로 추가된 링크들을 시험하게 된다. 이때 셀들은 전달 데이터로서 두 비트의 상보적인 워드를 담는다. 단계 i 의 추가된 링크들을 시험하기 위해서는, 먼저 단계 $i-1$ 의 모든 단위 스위치의 상위 출력 링크에서의 충돌을, 그림 8의 (a)와 그림 9의 (a)에 나타낸 바와 같이 만들고, 다음으로 단계 $i-1$ 의 모든 단위 스위치의 하위 출력 링크에서의 충돌을, 그림 8의 (b)와 그림 9의 (b)에 나타낸 바와 같이 만든다.

i 번째 단계의 모든 스위치들의 상위 출력 링크의 충돌을 만들기 위해서, $\log_2 N - i - 1$ 번째 자리수만 0이고 나머지 자리수들이 모두 1인 이진수와 원천지의 주소를 논리적인 AND를 하여, 결과로 만들어진 값을 스위칭 망으로 입력되는 셀들의 주소들로 사용한다.(여기서는 최소 유효비트(Least significant bit)가 첫 번째 숫자임을 가정한 다.) i 번째 단계의 모든 스위치들의 하위 출력 링크의 충돌을 만들기 위해서, $\log_2 N - i - 1$ 번째 자리수만 1이고 나

머지 자리수들이 모두 0인 이진수와 원천지의 주소들을 논리적인 OR를 하여, 결과로 만들어진 값을 입력되는 셀들의 주소들로 사용한다.

이러한 결합 진단법은 2차원 링-벤안 망, 그리고 사이클릭-벤안 망에 모두 사용할 수 있다. 2차원 링-벤안 망과 사이클릭-벤안 망은 각 단위 스위치에 2개의 추가 링크들을 가지고 있다. 그리고 앞서 제시한 두 번의 진단 단계들을 적용하여, 각 $i-1$ 스위칭 단계에서 야기한 셀 주소의 충돌들은, i 단계의 전체 단위 스위치들에게, 이탈 꼬리표 k 값이 1인 셀들을 각각 두개씩 전달한다. 따라서, 그림 8와 그림 9에 나타낸 바와 같이, 셀들이 추가된 모든 링크들을 통해 나아가게 됨으로써, 최종 출력 정합에서 추가된 링크들의 결합 위치를 추적하게 된다.

이러한 결합 진단법의 시간적 복잡도는, 각 스위칭 단계 별로 위의 두 단계의 시험이 이루어지므로, $O(\log_2 N)$ 이다. 그리고 첫 스위칭 단계의 시험을 위해서는 예외적으로 스위치로 입력하는 셀들의 이탈 꼬리표 k 의 값을 1로 설정하여 보내야 한다.

5. 결론

본 논문에서는, 교환기들과 분산/ 병렬 센서 망의 부

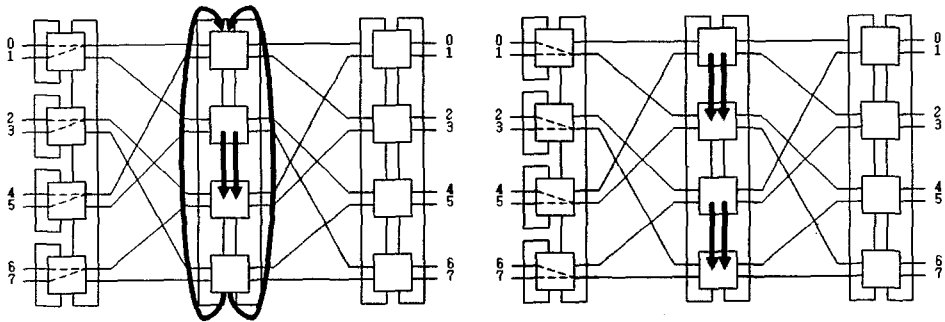
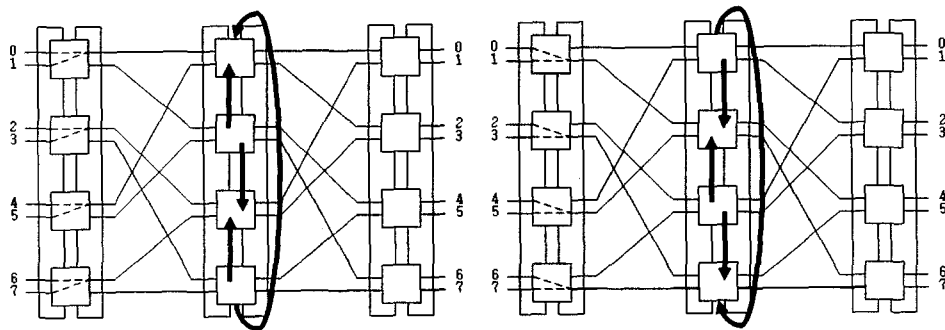


그림 8 2-차원 링-벤안 망에서의 하나의 추가된 링크 점착 결합 위치 검출



(a) 단계 1

(b) 단계 2

그림 9 사이클릭-벤안 망에서의 하나의 추가된 링크 점착 결합 위치 검출

시스템으로 응용되고 있는, 대부분의 스위칭 망의 기반이 되는 벤안 망에 링크들을 추가한 고성능 결합감내 다단 스위칭 망을 제시하였다. 그리고 이 확장 벤안 망의 모든 링크들을 결합이 발생한 링크들을 우회하는 대체 경로들을 만들기 위해 사용하는 적응 자기 경로제어 알고리즘을 제시하였다. 그리고 이 망의 성능과 신뢰성을 분석하였다. 또한 제시한 망에 사용될 수 있는 결합 진단법을 제시하였다.

제시된 다단 스위칭 망은 자기 경로제어라는 특성을 가진다. 이러한 경로제어 알고리즘 설계를 위해, 우리는 확장된 벤안 망의 각 스위칭 단계의 단위 스위치들이 자기 경로제어 관점에서 규칙적으로 배열되어 있다는 사실을 사용한다. 다시 말해 확장 벤안 망의 각 단들이 단일 순환 군의 나열로 구성되어 있다는 사실과 자기 경로제어 관점에서 인접한 스위칭 단계들간에 준동형(Homomorphism)이 존재하여, 모든 각 단계의 순환 군이 그 다음 단계의 부분군이라는 사실을 사용한다. 이러한 성질들을 활용하여, 추가된 링크들을 포함하는 모든 링크들을 사용하는 확장 벤안 망의 자기 경로제어에 적응성을 부여하는, 경로제어 알고리즘을 제시하였다. 또한, 확장 벤안 망에는 이웃한 두 스위칭 단계들로 구성된 팩터 군이 존재한다는 사실을 보이고, 이러한 팩터 군의 존재를 통해, 확장 벤안 망의 스위칭 단계들 간의 연결에 있어 규칙성을 코셋(Coset)으로 정리할 수 있음을 보였다.

제시된 스위칭 망은 기존의 결합감내 스위칭 망들보다 성능 측면에서 우수하다. 제안한 2-차원 링-벤안 망에 입력 부하 $\lambda = 0.9$ 를 부가하고, Hot Ratio r 을 0.6으로 설정하는 경우, 512×512 2-차원 링-벤안 망의 통과율은 사이클릭 벤안 망에 비해 8.7% 우수하다. 그리고 Hot Ratio를 0.8로 설정하는 경우, 통과율은 사이클릭 벤안 망 대비 21.1% 더 우수하다. 그리고, 제안된 스위칭 망에 입력 부하 $\lambda = 0.7$ 을 부가하고, Hot Ratio r 을 0.8으로 하였을 경우, 512×512 네트워크의 통과율은 사이클릭 벤안 망 대비 14%가 더 우수하다. 또한 1024×1024 2-차원 링-벤안 망에 입력 부하 $\lambda = 0.9$ 를 부가하고, Hot Ratio를 0.8로 하였을 경우, 통과율은 사이클릭 벤안 망 대비 20.4% 우수함을 알 수 있었다. Hot Ratio r 을 0.6으로 설정하였을 경우, 통과율은 7.6% 우수하다. 따라서, 제안된 스위칭 망은 인터넷 트래픽이 스위칭 망에 유입되면서 스위칭 망에 발생시키는 공간적인 혼잡과 같은 심한 비균일 트래픽을 수용하는 경우에 사이클릭 벤안 망 보다 더 적합하다고 할 수 있다.

균일한 트래픽으로 최대의 입력부하 $\lambda = 1.0$ 을 부가할 경우에는, 256×256 스위칭 망은 동일한 통과율을

보였으며, 이보다 작은 크기의 64×64 스위칭 망은 1.2%의 성능의 감소를 보였고, 이보다 큰 1024×1024 스위칭 망은 2.0%의 성능 증가를 보여, 거의 같은 성능임을 알 수 있었다. 제시된 스위칭 망의 신뢰성은 최근 제시된 Hui의 완전 체인된 감마 상호연결망 보다, 16×16 망은 27.5%, 64×64 망은 51.0% 높음을 알 수 있었다.

또한, 제시된 병행적 결합 감지 기법과 제시한 경로제어 알고리즘을 사용하여, 단위 스위치들은 셀을 전송함과 동시에 결합이 발생한 링크를 격리시킨다. 그리고 순차적 결합감지 기법을 사용하여, $N \times N$ 스위치의 결합의 위치를 $O(\log_2 N)$ 의 복잡도로 확인하여, 스위칭 망을 유지보수 할 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] Minsu Choi, N. Park, and F Lombardi, "Modeling and Analysis of Fault Tolerant Multistage Interconnection Network," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 52, No. 5, pp. 1509 - 1519, 2003.
- [2] Jae-Hyun Park, H. Yoon, and H. Lee, "The Deflection Self-routing Banyan Network: A Large-Scale ATM Switch using the Fully-Adaptive Self-routing and its Performance Analyses," *IEEE/ACM Trans. on Networking*, Vol.7, No.4, pp. 588-604, IEEE, U.S.A., August 1999.
- [3] Jae-Hyun Park and H. Lee, "A Fault-Tolerant Multistage Interconnection Network and Its Fault Diagnosis: Ring-Banyan Network," *International Journal of Computer Systems*, Vol.15, No.2, pp. 119-126, CRL Publishing Ltd., U.K., 2000.
- [4] G. Adams III, D.P. Agrawal, and H. J. Siegel, "A Survey and Comparison of Fault-Tolerant Multistage Interconnection Networks," *IEEE Computer*, Vol.20, No.6, pp. 14-27, June 1987.
- [5] Jae-Hyun Park, H. Yoon, H. Lee, and S. Eun, "The Ring-Banyan Network: A Fault-Tolerant Multistage Interconnection Network for Multiprocessor Systems," *International Journal of High Speed Computing*, pp. 557-577, World Scientific Publishing, U.S.A., 1994.
- [6] Jae-Hyun Park, H. Yoon, and H. Lee, "The Cyclic Banyan Network: A Fault Tolerant Multistage Interconnection Network with the Fully-Adaptive Self-routing," *Seventh IEEE Symposium on Parallel and Distributed Processing*, pp. 702-710, October 1995, Texas, U.S.A.
- [7] K. Y. Lee and H. Yoon, "The B-Network: A Multistage Interconnection Network with Backward Links," *IEEE Trans. on Comp.*, Vol.39, No.7, pp. 966-969, April 1990.
- [8] M. Anan and M. Guizani, "A Fault Tolerant ATM

- Switching Architecture," Proceeding of the IEEE International Performance, Computing, and Communications Conference 2000. IPCCC '00, pp. 295 - 301, Feb. 2000.
- [9] M.P. Haynos and Yuanyuan Yang, "An Analytical Model on the Blocking Probability of a Fault-Tolerant Network," IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, Vol. 10, No. 10, pp.1040 - 1051, 1999.
- [10] S.K. Hui, K. Seman, and J. Yunus, "An Augmented Chained Fault-Tolerant ATM Switch," 5th IEEE International Conference on High Speed Networks and Multimedia Communications, pp. 397 - 400, July 2002.
- [11] C.W. Chen, N.P. Lu, T.F. Chen, and C.P. Chung, "Fault-Tolerant Gamma Interconnection Networks by Chaining," IEE Proceedings- Computers and Digital Techniques, Vol. 147, No. 2, pp. 75 - 81, 2000.
- [12] J. A. Gallian, Contemporary Abstract Algebra, Second Edition, D. C. Health and Company, U.S.A., 1990.
- [13] K. Y. Lee and H. Yoon, "Indirect Star-Type Networks for Large Multiprocessor Systems," IEEE Trans. on Comp., Vol.40, No.11, pp. 1277-1282, November 1991.
- [14] R. Rojas-Cessa, E. Oki, and H. J. Chao, "Concurrent Fault detection for a Multiple-Plane Packet Switch," IEEE/ACM Trans. on Networking, Vol.11, No. 4, pp. 616-623, August 2003.
- [15] Y.-J. Cheng, T.-H. Lee, and W.-Z Shen, "Fault Diagnosis of a Distributed Knockout Switch," IEE Proc. - Commun., Vol.145, No. 4, pp. 241-248, August 1988.
- [16] C. Wu and T. Feng, "On a Class of Multistage Interconnections Networks," IEEE Trans. on Comp., vol.C-29, pp. 694-702, August, 1980.
- [17] C. W Weiss and A. D. Friedman, "Bounds on the Length of Terminal Stuck-fault Tests," IEEE Trans. on Comp., Vol.C-21, pp. 305-309, March 1972.
- [18] V. A. Vardanian, "On the complexity of terminal stuck-at fault detection tests for monotone Boolean functions," Proc. 12th IEEE VLSI Test Symposium, pp. 182-185, April 1994.
- [19] N. J. Davis IV and W. T.-Y. Hsu, "Fault Location Techniques for Distributed Control Interconnection Networks," IEEE Trans. on Comp., Vol C-34, pp. 902-910, Oct. 1985.



박재현

1988년 2월 중앙대학교 전자계산학과 졸업. 1991년 2월 한국 과학기술원 전산학과 석사. 1995년 8월 한국 과학기술원 전산학과 박사. 1995년 8월~2000년 2월 삼성전자 정보통신 본부 데이터네트워크 개발팀 MPLS/ATM 개발담당. 2000년 3월~2002년 8월 영남대학교 전자정보공학부, 정보통신 전공 교수. 2002년 9월~현재 중앙대학교 컴퓨터 공학부 교수. 관심분야는 ATM Switch Arch., 상호연결 망, Multi-protocol Label Switching System, Routing Protocols