

광 버스트 스위칭을 위한 광 교환기에서의 다중 누화고장 진단기법

Diagnosis of Multiple Crosstalk-Faults in Optical Cross Connects for Optical Burst Switching

김 영 재, 조 광 현
(Young-Jae Kim and Kwang-Hyun Cho)

Abstract : Optical Switching Matrix (OSM) or Optical Multistage Interconnection Networks (OMINs) comprising photonic switches have been studied extensively as important interconnecting blocks for Optical Cross Connects (OXC) based on Optical Burst Switching (OBS). A basic element of photonic switching networks is a 2×2 directional coupler with two inputs and two outputs. This paper is concerned with the diagnosis of multiple crosstalk-faults in OSM. As the network size becomes larger in these days, the conventional diagnosis methods based on tests and simulation become inefficient, or even more impractical. We propose a simple and easily implementable algorithm for detection and isolation of the multiple crosstalk-faults in OSM. Specifically, we develop an algorithm for isolation of the source fault in switching elements whenever the multiple crosstalk-faults are detected in OSM. The proposed algorithm is illustrated by an example of 16×16 OSM.

Keywords : optical cross connect, optical burst switching, crosstalk-fault, fault diagnosis, optical switch.

1. 서론

최근 인터넷 사용의 폭발적인 증가로 데이터 트래픽은 매 6개월마다 약 2배씩 증가되고 있으며 이러한 경향은 더욱 가속화 될 것이다. 급속히 증가하는 인터넷 트래픽과 이를 광대역/초고속으로 처리할 수 있는 광 기술의 발전은 광 네트워크의 등장배경이 되었다. 광 네트워크의 구축을 위하여 기존의 라우터벤더들은 광 기술의 장점을 접목하여 테라비트(terabit)급 라우터에 많은 노력을 기울이고 있다. 광 라우터에 주로 이용되는 스위칭 기술로는 광 회로 스위칭(optical circuit switching), 광 패킷 스위칭(optical packet switching), 광 버스트 스위칭(OBS: optical burst switching) 등이 있다. 현재 광 회로 스위칭 기술을 기반으로 하는 광 교환기(OXC: optical cross connect)는 상업화 단계에 이르렀으나 버스트한 인터넷 트래픽을 수용하기에는 효율성에 문제가 있다. 또한, 광 패킷 스위칭 기술은 버스트한 인터넷 트래픽을 수용하기에는 알맞은 기술이나 광 버퍼를 개발해야 하는 등 해결해야 할 기술적 문제들이 많이 있다. 한편, OBS는 이러한 문제점들을 극복하고 제한적이거나 광 패킷 스위칭 기능을 수행 할 수 있는 광 라우터 구축을 가능하게 하는 기술이다. 이러한 OBS기술이 미래의 통신시스템에서 요구되는 다양한 서비스 및 처리속도를 충족시키기 위해서는 OBS시스템자체가 대형화 되어야 한다[1]-[3]. 그러므로 OBS내부의 스위치 연결방법을 제공하는 N×N 매트릭스 스위칭(OSM: optical switching matrix or optical multistage interconnection networks)부분의 대형화는 전체망의 성

능 향상을 가져온다. 그러나 OSM의 대형화는 고장발생시 고장의 유형을 파악하고 위치를 찾아내는데 어려움을 초래한다. 이는 OBS의 내고장성 저하로 이어져 전체망의 성능에도 심각한 문제를 야기시킨다[4].

광 스위치(optical switch or coupler)를 사용하는 OSM에서 가장 큰 문제점은 누화(crosstalk)에 의해 발생하는 고장이다. 누화고장은 일종의 빛의 간섭현상이 원인이다. 이것은 광 소자를 사용하는 모든 매체에서 빈번히 발생하며, 광 스위치 채널을 통해서 전송되던 신호가 이웃한 다른 채널을 통해서도 나타나는 현상이다. 누화고장은 의도하지 않은 곳으로 신호를 보내게 되어 채널의 낭비를 초래하고, 다른 신호의 전송을 방해하게 된다[5], [6]. 그러므로 OBS의 신뢰도를 높이기 위해서는 누화고장에 대한 대책을 마련해야 한다. 이는 곧 전체 망의 신뢰도 향상을 의미하게 된다. OBS에서 고장이 일어나는지 계속 감시하면서 고장이 발생했을 때는 이를 정확하게 진단하여 그때에 필요한 조치를 취해 주어야 한다. 고장을 조기에 진단하는 기술은 OBS시스템의 내고장성 향상을 통해 시스템의 신뢰도를 높이기 위해서 반드시 필요하다. 지금까지 회로 스위칭 망이나 병렬컴퓨터시스템 등에서 사용하는 OSM에서의 누화고장 진단은 주로 테스트 기법을 사용하여 왔다. 하지만 OSM에만 국한된 테스트 기법은 망이 대형화 되면 고장 발생시 테스트 횟수의 증가로 이어져 수 차례의 테스트 이후에도 고장을 찾지 못하는 경우가 발생할 수 있다[7][8]. 그리고 최근 이러한 테스트 기법에 바탕을 둔 알고리즘을 이용하여 OSM에서 좌우 대칭적(symmetry)인 누화고장 발생시 고장 진단 하는 기법과 분산 기법을 적용한 테스트 기법등이 소개 되고 있다[9][10]. 그러나 OSM에서 얻을 수 있는 정보에도 한계가 따른다. 그러므로 테스트 기법의 한계점을 극복하고 효과적인 고장진단을 위해서는 OXC차원의 해석적

논문접수 : 2002. 5. 18., 채택확정 : 2003. 1. 30.

김영재, 조광현 : 울산대학교 전기전자정보시스템공학부
(kyj@sys.ulsan.ac.kr/ckh@mail.ulsan.ac.kr)

* 이 논문은 2001년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구가 되었음. (KRF-2001-041-E00279)

접근방법에 의한 고장진단기법의 연구가 필요하다. 이에 본 논문에서는 OBS기술을 기반으로 하는 OXC의 전기적 제어부로부터 송수신지 주소정보, 파장정보 등을 분석하여 다중 누화고장 발생시 단 한번의 알고리즘 수행으로도 효과적으로 OSM의 고장을 진단할 수 있는 방법론을 제안한다. 본 알고리즘은 대수적 방법으로 광 스위치를 모델링한 후 OBS의 제어부와 OSM의 상호관계를 정의함으로써 대수적 연산에 의한 고장진단이 가능한 알고리즘을 제안하였다. 그리고 제안한 알고리즘이 정확한 고장진단이 가능함을 모의실험을 통해 보였으며 복잡도 비교를 통해서 OSM의 규모가 증가하여도 본 알고리즘이 고장진단시 수행시간의 변화가 테스트 기법보다는 적음을 보였다.

II. 광 버스트 스위칭

1. 광 버스트 스위칭의 특징

일반적으로 정의되고 있는 광 버스트 스위칭을 보면, OBS의 교환단위는 광 회로 스위칭 방식과 광 패킷 스위칭 방식의 중간에 해당하는 가변길이의 버스트를 기본단위로 이용한다. 데이터 버스트와 제어 패킷은 서로 분리된 파장 채널을 통하여 전송된다. 버스트를 위한 파장 채널은 DCG(data channel group)라 하고 제어 패킷을 위한 파장 채널은 CCG(control channel group)라 한다. OBS는 제어 패킷이 선행하면서 후행하는 버스트에 대한 전송자원(대역폭)을 예약한다. 또한 OBS방식의 노드는 일반적으로 광 버퍼를 사용하지 않는다. 그리고 OBS방식의 광 교환기는 제어 패킷을 위한 전기적인 제어부(control unit)와 광전변환이 없이 데이터 버스트의 투명한 교환이 수행되는 광 교환부(OSM)로 구성된다. 제어부에서는 입력되는 광 신호를 전기적 신호로 변환하여 처리한 후 다시 광 신호로 바꾸는 O/E/O(optical-to-electrical-to-optical)변환을 수행하며 이때 신호는 전기적 버퍼에 저장하게 된다[3][11].

그림 1에서 보여주듯이 송신측(source)에서 전송해야 할 버스트가 발생했을 경우, 이 데이터 버스트를 바로 전송하는 것이 아니고 전기적인 제어부에서 제어정보, 즉 송수신 주소, 오프셋(offset)시간, 파장 정보, 요구 대역폭, 그리고 QoS (quality of service)정보 등을 담은 제어 패킷(BCP:burst control packet)을 먼저 보내어 이후에 전송될 데이터버스트에 대한 채널을 예약한다. 이때 제어 패킷에 대응하는 데이터 버스트는 일정한 오프셋시간 동안 전기적 버퍼에 저장되어 대기 한 후 전송된다[11].

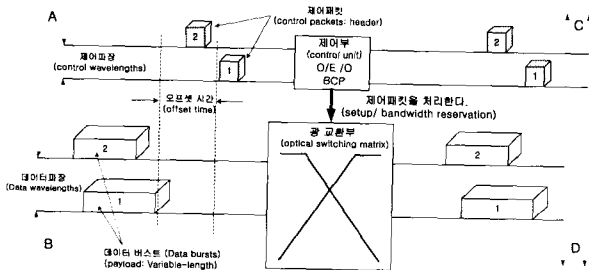


그림 1. 광 버스트 스위칭.
Fig. 1. Optical burst switching.

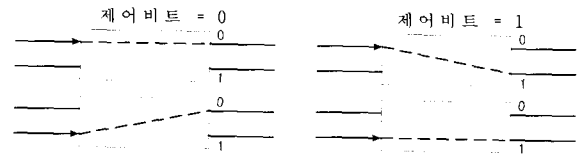


그림 2. 광 스위치 동작형태.
Fig. 2. Operation of an optical switch.

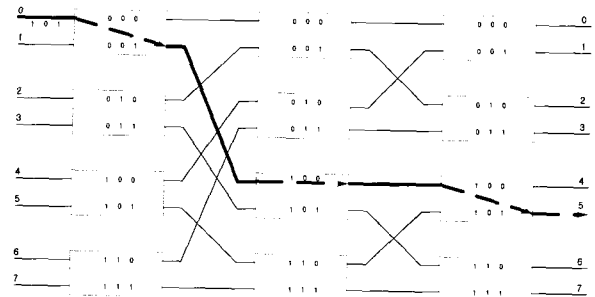


그림 3. 8x8 벤안 망.
Fig. 3. 8x8 Banyan network.

2. OSM의 구조

OSM은 N 개의 입력과 N 개의 출력 사이의 연결을 제공하며 $m(= \log_2 N)$ 개의 단(stage)으로 이루어져 있다. 그림 2는 OSM을 구성하는 2x2 광 스위치의 4가지 동작형태를 나타낸다. 2x2 광 스위치는 OBS의 제어부에서 제공하는 제어비트(스위치의 라우팅 정보)를 참조하여 제어비트가 0이면 상위 포트(port)로, 1일 때는 하위 포트로 각각 라우팅한다. 이때 제어비트는 광 스위치 내부에서 라우팅을 위한 정보로 사용되며, 출력포트를 나타내는 식별자이다. 즉, 제어비트는 OSM에서 목적지(destination)정보를 가지고 있으며, 각 단계에서는 광 스위치의 라우팅을 결정하게 된다[6][8].

OSM은 광 스위치의 연결관계에 따라 벤안(banyan), 오메가(omega), 큐브(cube)망 등으로 망의 종류를 구분하고 있다. 본 논문에서는 이 가운데 가장 널리 쓰이는 벤안스위칭 구성을 갖는 망을 대상으로 한다. 그림 3에 8개의 입·출력 포트를 갖는 8x8 벤안 망의 예가 나타나 있다.

그림 3에서 제어비트 101(십진수 5)을 가진 신호가 0번 포트에 입력되고 있다. 이 신호는 출력포트 #5에 전송되어야 할 신호이다. 제어비트는 가장 왼쪽비트가 최상위 비트이며 왼쪽에서 오른쪽으로 비트의 순서가 정해진다. 첫 번째 단의 2x2 광 스위치에서는 제어비트 101의 최상위 비트 1에 의해 하위 포트, 두 번째 단계에서는 제어비트의 2번째 비트 0에 의해 상위포트로, 세 번째 단은 제어비트의 3번째 비트 1에 의해 하위포트로 라우팅하여 목적지까지 신호가 전송된다[8][13].

III. 누화고장 모델과 OSM을 위한 가상라우팅 테이블의 구성

1. 누화고장 진단을 위한 광 스위치의 대수적 모델링

광 스위치에서 누화고장이 발생하는 경우 그림 4와 같은 4가지 유형으로 분류된다. 이때 스위치에 누화 신호가 발생하면 정상적인 라우팅 경로와 누화 신호에 의해 설정된 라우팅 경로가 설정되게 된다. 그림 4의 실선은 정상적인

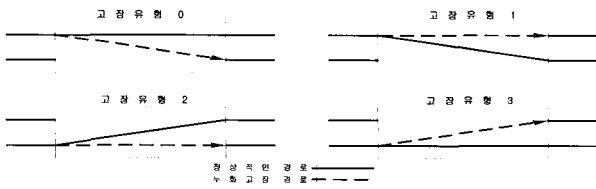


그림 4. 4가지 유형의 누화고장.
Fig. 4. 4 types of crosstalk-faults.



그림 5. 광 스위치의 모델링.
Fig. 5. Modeling of an optical switch.

라우팅 경로이며, 점선은 누화신호에 의해 생성된 잘못된 라우팅 경로이다. 따라서 OSM에 그림 4와 같은 누화고장이 발생한 광 스위치를 포함하게 되면 정상적인 신호의 흐름을 방해 받거나 막히게 된다. 이로 인하여 데이터흐름을 방해하는 충돌(conflict) 문제와 한정된 망 자원의 손실 등이 유발된다[8].

제어비트 c_k (k 번째 단의 제어비트)를 갖는 광 스위치 그림 5와 같이 모델링하여 다음과 같이 기술하였다. 상위 포트와 하위포트를 각각 α, β 라 하고, 출력측의 상위포트와 하위 포트는 γ, δ 라고 한다.

정의 1 : OSM의 k 단에 위치한 광 스위치의 입력 행렬은 하기와 같이 정의한다.

$$M_k = \begin{bmatrix} \text{상위포트} \\ \text{하위포트} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix}$$

α, β 에 입력 신호가 존재하면 1 그렇지 않으면 0의 값을 갖는다.

정의 2 : OSM의 임의의 광 스위치에 대한 출력 행렬은 다음과 같이 정의한다:

$$M_o = \begin{bmatrix} \text{상위포트} & \text{하위포트} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma & \delta \end{bmatrix}$$

이때 스위치에 누화고장이 존재한다면 γ, δ 값은 정상적인 출력이면 1, 누화고장에 의해 발생한 출력이면 0으로 표기한다. 0은 출력포트를 나타낸다.

OSM에서 k 단에 해당되는 제어비트 C_k 와 γ, δ 의 관계는 $\gamma = 1 - c_k, \delta = c_k$ 라 하였다. OSM에서 신호의 입력이 시작되는 입력 포트의 이진 주소를 통해 각 단에서 이 신호가 전송될 경로에 위치한 스위치의 입력 행렬 M_k 를 알 수 있다. 이때 OSM의 임의의 시작지 포트 ϕ 를 통해 입력된 신호의 전송경로에 위치한 스위치들의 전체 입력 행렬 Φ_T 는 다음과 같이 정의된다.

정의 3 : 광 스위치에 누화고장이 존재할 때 누화고장 행렬(crosstalk-fault matrix) C_M 은 다음과 같이 정의한다:

$$C_M = M_k \cdot M_o = \begin{bmatrix} \alpha(1-c_k) & \alpha c_k \\ \beta(1-c_k) & \beta c_k \end{bmatrix}$$

정의 4 : OSM의 임의의 2진 코드워드 $\phi = \phi_{m-1} \phi_{m-2} \dots \phi_1 \phi_0$ 인 시작지 포트를 통해 입력된 신호의 전송경로에 위치한 스위치들의 전체 입력 행렬은 $2 \times m$ 행렬이며 다음과 같이 정의한다:

$$\Phi_T = [M_1 \ M_2 \ \dots \ M_m] \\ = \begin{bmatrix} \text{inv}(\bar{\phi}) \\ \text{inv}(\phi) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{\phi}_0 & \bar{\phi}_1 & \dots & \bar{\phi}_{m-2} & \bar{\phi}_{m-1} \\ \phi_0 & \phi_1 & \dots & \phi_{m-2} & \phi_{m-1} \end{bmatrix}$$

열 정보는 각 단의 입력 행렬 정보를 의미하며 $\bar{\phi}, \text{inv}(\cdot)$ 는 각각 ϕ 에 논리연산 NOT을 취한 것과 ϕ 의 2진 코드 워드를 역으로 재배열 한 것이다[10].

2. 가상 라우팅 테이블

그림 2에서 보인 스위치의 4가지 연결상태를 다시 동일한 형태의 2가지 연결 모양으로 축약하여 그림 6과 같이 달리 표현할 수 있다. 이때 제어비트에 의해서 스위치가 병렬연결(P: parallel connection)일 때 스위치 상태값은 0을 교차 연결(X: cross connection)이면 스위치 상태값은 1을 갖는다[13][14].

이 2가지 스위치 연결상태만을 고려하여 OSM에서 새로운 가상 라우팅 경로(VRP: virtual routing path)를 설정할 수 있으며, 이를 이용하여 오프라인(off-line)상에 새로운 가상 라우팅 테이블(VRT: virtual routing table)을 구성할 수 있다. 이를 통해 4가지 상태를 고려했을 때 보다 간소화된 VRT의 구성이 가능하다. 그리고 고장진단시에는 스위치의 연결형태에 관한 정보와 위치정보를 제공하는 역할을 한다. OSM에서 각 단계는 주소 공간의 한 비트(차원)를 통제하기 때문에 임의의 광 스위치 쌍을 연결하는데 필요한 스위치 상태값은 쉽게 결정된다. 스위치의 상태값은 VRT에서

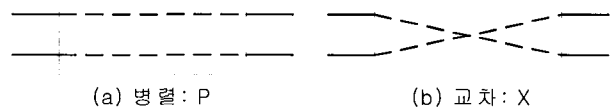


그림 6. 스위치의 연결상태.
Fig. 6. Connection status of a switch.

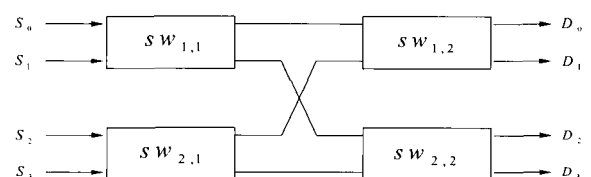


그림 7. 4x4 OSM의 예.
Fig. 7. The example of 4x4 OSM.

표 1. 4×4 OSM 가상 라우팅 테이블.

Table 1. Virtual routing table of 4×4 OSM.

| (S,D or P) | Switch | | R | (S,D or P) | Switch | | R |
|------------|-------------------|-------------------|-----|------------|-------------------|-------------------|-----|
| | # 1 | # 2 | | | # 1 | # 2 | |
| (0,0) | sw _{1,1} | sw _{1,2} | 0 0 | (1,0) | sw _{1,1} | sw _{1,2} | 1 0 |
| (0,1) | sw _{1,1} | sw _{1,2} | 0 1 | (1,1) | sw _{1,1} | sw _{1,2} | 1 1 |
| (0,2) | sw _{1,1} | sw _{2,2} | 1 0 | (1,2) | sw _{1,1} | sw _{2,2} | 0 0 |
| (0,3) | sw _{1,1} | sw _{2,2} | 1 1 | (1,3) | sw _{1,1} | sw _{2,2} | 0 1 |
| (S,D or P) | Switch | | R | (S,D or P) | Switch | | R |
| # 1 | # 2 | # 1 | | | # 2 | | |
| (2,0) | sw _{2,1} | sw _{1,2} | 0 1 | (3,0) | sw _{2,1} | sw _{1,2} | 1 1 |
| (2,1) | sw _{2,1} | sw _{1,2} | 0 0 | (3,1) | sw _{2,1} | sw _{1,2} | 1 0 |
| (2,2) | sw _{2,1} | sw _{2,2} | 1 1 | (3,2) | sw _{2,1} | sw _{2,2} | 0 1 |
| (2,3) | sw _{2,1} | sw _{2,2} | 1 0 | (3,3) | sw _{2,1} | sw _{2,2} | 0 0 |

OSM의 새로운 가상 라우팅 정보가 된다. 그림 7의 4×4 OSM의 예를 들어 설명하겠다.

그림 7에서 발원지 S=1을 D=3으로 연결하기 위한 스위치 상태값 R=01이다. 즉 첫번째 단계에서는 스위치가 P상태이고, 두번째 단계에서는 X상태임을 알 수 있다. 이를 이용하여 4×4 OSM의 VRT를 표 1과 같이 완성할 수 있다. 이와 같은 방법으로 확장된 N×N OSM에서의 VRT생성도 가능하다[12].

IV. OBS를 위한 다중 고장진단 알고리즘

본 절에서는 앞 절에서 제시한 광 스위치의 대수적 모델과 VRT를 이용하여 다중 누화고장 발생시 OSM에서 고장의 위치를 찾아내고, 고장의 유형을 진단하는 알고리즘을 제시한다.

1. 고장진단과정을 위한 블록다이어그램

그림 8은 OBS의 OSM에 다중누화고장 발생시 고장진단 과정의 전체 메커니즘(mechanism)을 블록다이어그램으로 표현한 것이다. 그림에서 크게 고장진단을 위한 처리부분과 고장이 없을 때 OBS에서 정상적으로 데이터 버스트를 처리하는 부분으로 나눌 수 있다. 먼저 고장진단을 위한 처리 과정에서는 파장에 발생하는 에너지 손실(WPL: wavelength power loss)여부를 광 소자를 사용하여 검출해낸다. 일반적으로 광 통신 시스템에서 발생하는 광 소자의 고장, 파장이나 채널의 문제점은 파장의 에너지 손실 및 변화 여부를 통해 검출해낸다[6][15]. 누화고장 또한 원래 신호의 에너지 누수로 발생한 신호가 이웃한 다른 채널에 나타나는 현상이다[5]. 그러므로 WPL의 변화를 감지하여 OSM에 존재하는 채널들이 정상적인 채널인지 아닌지를 알아낼 수 있다. 만약 고장이 확인 되면 WPL검출부에서는 제어부에 고장을 통보하고 BCP로부터 제어 정보인 송수신지정보(S: source, D: destination), 파장정보(λⁱ)를 고장진단 알고리즘에 통보한다. 이때 BCP가 갖고있는 제어정보에서 파장 λⁱ에 의해 송신지 S에서 수신지 D로 설정되는 채널을 λⁱ(S,D)라 하며 이들의 집합을 Σ라 한다. 그리고 WPL검출부에서는 에너지 손실이 존재하는 파장을 검출하면, OSM에서 출력이 존재하는 모든 포트정보를 확인하여 파

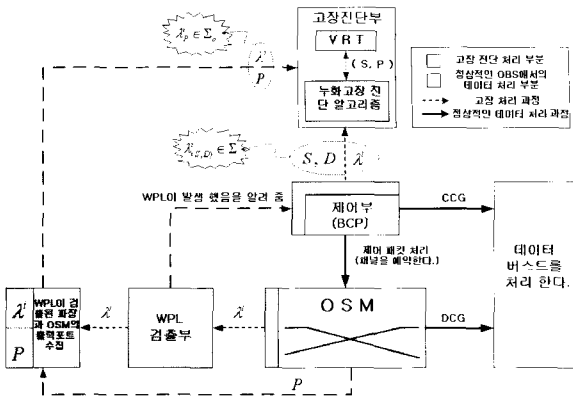


그림 8. 고장진단과정의 블록다이어그램. Fig. 8. Block diagram of the fault diagnosis procedures.

장이 λⁱ이고 출력포트가 P인 모든 채널정보 λⁱ_P를 고장진단 알고리즘에 알려준다. 즉, OSM에서의 고장존재여부가 확인되면 출력이 관찰된 모든 출력포트와 파장정보 λⁱ_P들의 집합 Σ_o를 수집하여 고장진단 알고리즘에 알려준다. 이때 i는 임의의 파장 번호로 i=1,2,3,...순으로 표기하며 S, D와 P는 십진수 또는 이진수로 표기한다.

정의 5 : λⁱ(S,D)의 모든 집합 Σ는 다음과 같다:

$$\Sigma = \{ \forall \lambda^i_{(S,D)} \mid \text{파장 } \lambda^i \text{에 의해 } (S,D) \text{로 설정된 채널들} \} \quad (1)$$

식 (1)로부터 다음의 3가지 정보를 알 수 있다.

$$\Sigma_{(S,D)} = \{ \forall (S,D) \text{ 채널로 사용되는 모든 } (S,D) \text{의 집합} \} \quad (2)$$

$$\lambda^i_S = \{ S \mid S \text{는 파장 } \lambda^i \text{에서의 송신지 주소} \} \quad (3)$$

$$\lambda^i_D = \{ D \mid D \text{는 파장 } \lambda^i \text{에서의 수신지 주소} \} \quad (4)$$

정의 6 : Σ_o는 다음과 같이 정의 된다:

$$\Sigma_o = \{ \emptyset, \Sigma^{i'}_{ro}, \Sigma^{i'}_{fo} \} \quad (5)$$

$$\Sigma^{i'}_{ro} = \{ \lambda^i_P \mid \lambda^i_P \text{는 } P=D \text{인 경우} \} \quad \text{단, } \left| \Sigma^{i'}_{ro} \right| = 1 \quad (6)$$

$$\Sigma^{i'}_{fo} = \{ \forall \lambda^i_P \mid \lambda^i_P \text{는 } P=D \text{ 또는 } P \neq D \text{인 경우} \} \quad \text{단, } \left| \Sigma^{i'}_{fo} \right| \geq 2 \quad (7)$$

$$\Sigma_o = \{ \emptyset \mid \emptyset \text{는 출력이 존재하지 않는 경우} \} \quad (8)$$

그리고 Σ_o를 통해 OSM에서 파장 λⁱ가 관측된 모든 출력포트 주소의 정보를 알 수가 있다.

$$\lambda^i_P = \{ \forall P \mid \text{OSM에서 파장 } \lambda^i \text{를 갖는 출력포트 } P \text{의 집합} \} \quad (9)$$

여기서 Σ^{i'}_{ro}는 BCP의 제어정보 중에서 목적지 정보 D와 출력이 관찰된 출력포트 주소 P가 일치하는 경우로써 P에서 파장 λⁱ를 사용한 정상적인 출력들의 집합이다. Σ^{i'}_{fo}는 파장 λⁱ를 사용하는 서로 다른 모든 출력포트에서 P와 D가 일치하는 경우와 그렇지 않은 경우를 모두 포함하는 집

합이다. 즉, 파장 λ^i 를 사용하는 정상적인 출력과 비정상적인 출력 모두를 모아놓은 집합이다. \emptyset 는 OBS에 입력이 존재하지 않거나 동작하지 않는 경우이다. 만약 모든 채널이 문제가 없다면 제어부의 BCP는 제어정보를 통해 채널을 예약 할 것이며 데이터 버스트는 일정한 오프셋시간동안 전기적인 버퍼에 저장되어 대기한 후 전송된다.

2. 다중 누화고장 진단알고리즘

고장이 발생하면 그림 8과 같이 OSM의 고장요소 정보인 Σ_o 와 OBS제어부의 Σ 를 고장진단부의 고장진단 알고리즘에 알려준다. 다음은 이를 이용한 고장진단 알고리즘의 수행 과정이다.

OSM에서 고장이 발생한 스위치를 찾기 위한 고장위치 알고리즘의 과정은 다음과 같다.

단계 1 : Σ 에서 λ_s^i, λ_p^i 와 $\Sigma_{(S,D)}$ 를, Σ_o 에서는 $\Sigma_{fo}^{\lambda^i}, \Sigma_{fp}^{\lambda^i}$ 에 관한 정보를 알 수 있다.

단계 2 : 단계 1에서 알아낸 (2), (3), (9)를 이용하여 $\Sigma_{fo}^{\lambda^i}$ 에서 정상적인 채널과 고장채널을 분류한다. $\Sigma_{fo}^{\lambda^i}$ 에서 파장 λ^i 를 사용하는 정상적인 OSM의 채널을 $C_r^{\lambda^i}$ 라 하면, 고장채널은 $C_f^{\lambda^i}$ 라 한다. 이의 연산은 하기와 같다.

$$\begin{aligned} C_r^{\lambda^i} &= (\lambda_s^i \times \lambda_p^i) \cap \Sigma_{(S,D)} \\ C_f^{\lambda^i} &= (\lambda_s^i \times \lambda_p^i) - \Sigma_{(S,D)} \end{aligned} \quad (10)$$

단, $\lambda_s^i \times \lambda_p^i = \{ \forall (S, P) \mid \text{순서쌍}(S, P) \text{의 집합} \}$ 이다. 여기서 파장 λ_i 를 이용하는 정상적인 경로를 갖는 채널은 단 하나만이 존재할 것이다. 즉, $|C_r^{\lambda^i}| = 1$ 이다. 하지만 다수의 누화고장이 발생한 스위치가 존재한다면 $C_f^{\lambda^i}$ 의 원소의 수는 $1 \leq C_f^{\lambda^i} \leq m$ 이 될 것이다. 즉, 하나의 채널이 고장이 발생한 스위치를 포함할 수 있는 최대 개수는 m 개이다.

단계 3 : VRT에서 $C_r^{\lambda^i}, C_f^{\lambda^i}$ 의 모든 원소들 (S, P)에 해당하는 R을 참조한다.

단계 4 : 단계 3에서 얻은 정보를 이용하여 OSM에서 고장스위치의 위치 정보인 i 행 j 열(단)에 해당하는 고장스위치 $SW_{i,j}$ 를 다음 연산으로 찾는다. 이때 $C_r^{\lambda^i}, C_f^{\lambda^i}$ 각각의 원소에 해당하는 (S,P)를 VRT에서 참조한 값 R을 $R_f = C_r^{\lambda^i}(S,P), R_r = C_f^{\lambda^i}(S,P)$ (단, $R_f, R_r \in R$) 이라 하면,

$$SW_{i,j} = C_f^{\lambda^i}(S,P) \oplus C_r^{\lambda^i}(S,P) = R_f \oplus R_r \quad (11)$$

이다. 각각의 $C_f^{\lambda^i}$ 의 원소에 해당하는 R_f 값들과 $C_r^{\lambda^i}$ 의 R_r 이 배타적 연산의 결과에서 비트 값이 1인 위치를 찾는다. 이때 $C_f^{\lambda^i}$ 원소의 개수 $K(1 \leq K \leq m)$ 만큼 배타적 연산을 수행한다. 즉, $R_f = [r_1 \ r_2 \ \dots \ r_k]^T$ 이라면,

$$\begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ \vdots \\ r_k \end{bmatrix} \oplus R_r = \begin{bmatrix} r_1 \oplus R_r \\ r_2 \oplus R_r \\ \vdots \\ r_k \oplus R_r \end{bmatrix} \quad (12)$$

이다.

단계 5 : $C_f^{\lambda^i}$ 의 원소 (S, P)에 해당하는 VRT의 $sw_{i,j}$ 를 참조한다. 이때 단계 4에서 얻은 각각의 배타적 연산결과에서 비트 값이 1인 위치에 해당하는 스위치가 고장 발생 스위치이다. 즉, 고장이 발생한 광 스위치의 위치 정보인 i 와 j 를 알 수 있다.

고장이 발생한 광 스위치는 단락 III에서 제시한 광 스위치의 대수적 모델과 Σ 에서 제공하는 S, D와 고장위치 알고리즘을 통해 알게된 정보 j 를 이용하여 그림 4에서 제시한 고장 유형으로 고장을 결정할 수 있다[10]. 각 과정은 다음과 같다.

단계 6 : $s = s_{m-1} s_{m-2} \dots s_1 s_0$ 를 이용하여 Φ_T 를 찾으면,

$$\Phi_T = \begin{bmatrix} inv(\bar{s}) \\ inv(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{s}_0 & \dots & \bar{s}_j & \dots & \bar{s}_{m-1} \\ s_0 & \dots & s_j & \dots & s_{m-1} \end{bmatrix} \quad (13)$$

단계 7 : Φ_T 에서 j 에 해당하는 $M_j = \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix}$ 를 찾는다.

단계 8 : M_j 와 D에서 j 단에 해당하는 제어비트 값 C_j 를 참조하여 $C_M = \begin{bmatrix} \alpha(1-c_j) & \alpha c_j \\ \beta(1-c_j) & \beta c_j \end{bmatrix}$ 을 구성한다. (14)

단계 9 : $M_o = (M_j)^T \cdot C_M = [\gamma \ \delta]$ 를 찾는다. (15)

단계 10 : $M_{i,j}$ 와 M_o 를 분석하여 고장유형을 결정한다. 만약 단계 7에 의해 $M_j \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$ 이고, $M_o^T = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$ 이면 이는 임의의 광 스위치의 하위포트에 입력 주어졌을 때 누화고장이 발생하여 상위출력포트는 정상적인 출력이 하위출력포트는 누화고장 출력이 발생했음을 의미하며 그림 4의 고장유형 2에 해당된다.

본 알고리즘에서 고장이 발생한 채널(파장)의 수 즉, $\Sigma_{fo}^{\lambda^i} \in \Sigma_o$ 일 때 Σ_o 에서 $\Sigma_{fo}^{\lambda^i}$ 의 개수를 n_i 라 하고, 식 12에서 보인 파장 당 발생 할 수 있는 최대 배타적연산의 수를 $m(= \log_2 M)$ 이라 하면 요구되어지는 알고리즘 연산의 복잡도는 $O(n_i \log_2 M)$ 이다. 이상의 알고리즘은 주로 논리적 연산을 통해 수행되므로, 고장 발생시 고장의 위치 및 유형을 정확히 파악하여 신속한 고장진단을 가능하게 하는 동시에 정확한 고장정보를 제공함으로써 빠른 고장 복구를 가능하게 한다.

V. 고장진단의 예

다음은 앞 절에서 제안한 알고리즘을 이용하여 다중 누화고장이 발생한 16x16 배안 망 형태를 갖는 OSM의 고장진단 과정을 보인다. 그림 9는 5개의 각기 다른 파장을 사용하여 채널을 설정하였다. 그러나 다수의 누화고장이 발생한 광 스위치들로 인해 원하지 않는 많은 수의 채널 또한 설정 되었다. 그림 9의 OSM에서 이들의 잘못된 채널을 만들어낸 광 스위치를 찾을 것이다.

WPL검출부로부터 고장이 발생했음을 제어부가 통보받

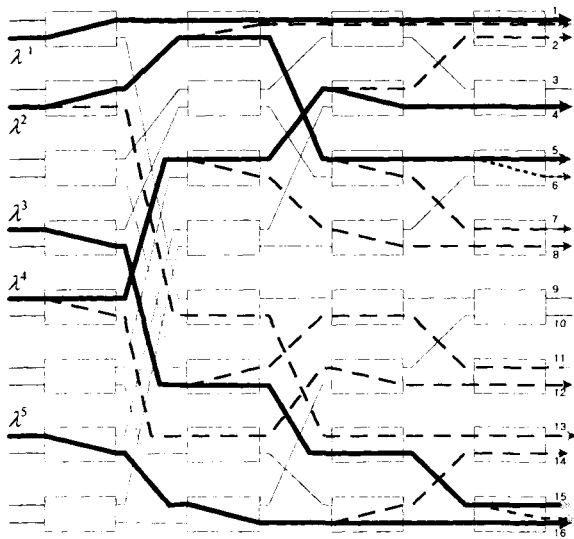


그림 9. 16×16 OSM의 고장진단 예.
Fig. 9. Fault diagnosis of the example 16×16 OSM.

으면 BCP의 제어정보인 Σ 와 WPL검출부에서 수집한 고장 요소 정보인 Σ_o 를 고장진단 알고리즘에 알려준다.

단계 1 : Σ 와 Σ_o 를 분석한다.

먼저, $\Sigma = \{\lambda^1_{(1,0)}, \lambda^2_{(3,4)}, \lambda^3_{(6,14)}, \lambda^4_{(8,3)}, \lambda^5_{(12,15)}\}$ 이를 통해 다음을 알 수 있다.

$$\Sigma_{(S,D)} = \{(1,0), (3,4), (6,14), (8,3), (12,15)\}$$

$$\lambda^1_S = \{1\}, \lambda^2_S = \{3\}, \lambda^3_S = \{6\}, \lambda^4_S = \{8\}, \lambda^5_S = \{12\}$$

$$\lambda^1_D = \{0\}, \lambda^2_D = \{4\}, \lambda^3_D = \{14\}, \lambda^4_D = \{3\}, \lambda^5_D = \{15\}$$

다음으로 $\Sigma_o = \{\Sigma_{ro}^{\lambda^1}, \Sigma_{fo}^{\lambda^1}, \Sigma_{fo}^{\lambda^2}, \Sigma_{fo}^{\lambda^3}, \Sigma_{fo}^{\lambda^4}, \Sigma_{fo}^{\lambda^5}\}$ 에서 다음을 얻을 수 있다.

단 $|\Sigma_{ro}^{\lambda^i}| = 1, |\Sigma_{fo}^{\lambda^i}| \geq 2$ 경우이다.

$$\Sigma_{ro}^{\lambda^1} = \{\lambda^1_0\}, \Sigma_{fo}^{\lambda^2} = \{\lambda^2_0, \lambda^2_4, \lambda^2_5, \lambda^2_6, \lambda^2_{12}\}, \Sigma_{fo}^{\lambda^3} = \{\lambda^3_{10}, \lambda^3_{14}, \lambda^3_{15}\}$$

$$\Sigma_{fo}^{\lambda^4} = \{\lambda^4_3, \lambda^4_7, \lambda^4_{11}\}, \Sigma_{fo}^{\lambda^5} = \{\lambda^5_{13}, \lambda^5_{15}\}$$

위 식에서 동일한 과정이 관찰된 출력 포트들이 두개 이상인 집합을 찾아보면 $\lambda^2_p = \{0, 4, 5, 6, 12\}, \lambda^3_p = \{10, 14, 15\}, \lambda^4_p = \{1, 3, 7, 11\}, \lambda^5_p = \{13, 15\}$ 이다.

단계 2 : 각각의 $\Sigma_{fo}^{\lambda^i}$ 에서 정상 채널과 고장 채널을 분류한다. 본 과정에서는 λ^3 에 의해 설정된 채널들을 분석하여 보고 이하 다른 과정에 의해 설정된 채널도 동일한 방법으로 분석이 가능하다.

$$\lambda^3_S \times \lambda^3_D = \{(6,10), (6,14), (6,15)\}$$

$$C_r^{\lambda^3} = \{(6,10), (6,14), (6,15)\} \cap \{(1,0), (3,4), (6,14), (8,3), (12,15)\} = \{(6,14)\}$$

$$C_f^{\lambda^3} = \{(6,10), (6,14), (6,15)\} - \{(1,0), (3,4), (6,14), (8,3), (12,15)\} = \{(6,10), (6,15)\}$$

λ^3 에 설정된 채널 중에서 14번 포트의 출력은 정상적인 채널에 의한 출력이다. 그리고 10, 15의 출력은 모두 OSM

의 광 스위치에 누화고장이 발생하여 생긴 잘못된 채널들이다.

단계 3 : VRT에서 (S, P)에 관한 정보를 참조한다.

표 2. 16×16 OSM 가상 라우팅 테이블.

Table 2. Virtual routing table of 16×16 OSM.

| (S, D or P) | Switch | | | | R |
|-------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|------|
| | #1 | #2 | #3 | #4 | |
| (6,10) | sw _{4,1} | sw _{6,2} | sw _{5,3} | sw _{6,4} | 1100 |
| (6,14) | sw _{4,1} | sw _{6,2} | sw _{7,3} | sw _{8,4} | 1000 |
| (6,15) | sw _{4,1} | sw _{6,2} | sw _{7,3} | sw _{8,4} | 1001 |

표 2는 λ^3 에 대한 일부분의 VRT만 보였으나, 모든 과정에 대해 고장진단알고리즘은 VRT로부터 정보를 제공받게 된다.

단계 4 : $C_f^{\lambda^3} = \{(6,14)\}, C_r^{\lambda^3} = \{(6,10), (6,15)\}$ 를 VRT를 참조하여 (11)을 수행하면,

$$C_f^{\lambda^3}(6,10) \oplus C_r^{\lambda^3}(6,14) = 1100 \oplus 1000 = 0100$$

$$C_f^{\lambda^3}(6,15) \oplus C_r^{\lambda^3}(6,14) = 1001 \oplus 1000 = 0001$$

단계 5 : 잘못된 채널 (6,10)은 두 번째 단의 스위치 sw_{6,2}에 의해서 설정되었으며, (6,15)는 스위치 sw_{8,4}에 의해서 생성된 채널이다. 다음 과정들은 과정 λ^3 에서 발생한 고장 스위치 중에서 sw_{6,2}의 고장유형을 찾아 보겠다. 다른 고장스위치들도 이와 동일한 과정을 통해 찾을 수 있다.

단계 6 : λ^3 가 입력된 근원지 주소 S=0101이므로,

$$\Phi^T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

단계 7 : 2번째 단에 해당하는 $M_{6,2} = \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$ 이다.

단계 8 : λ^3 의 목적지 주소 D=1110이므로 $c_2 = 1$ 이다.

그러므로 $C_M = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ 이 된다.

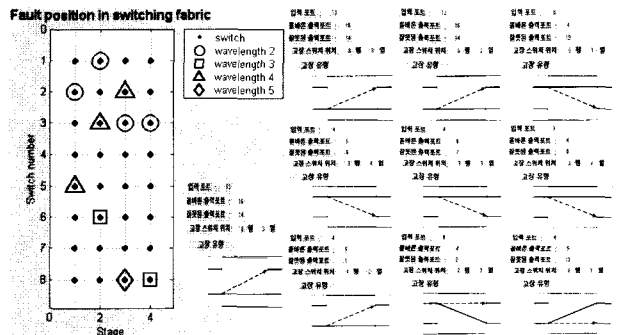


그림 10. 16×16 OSM의 모의실험 결과.

Fig. 10. Simulation results of the example 16×16 OSM.

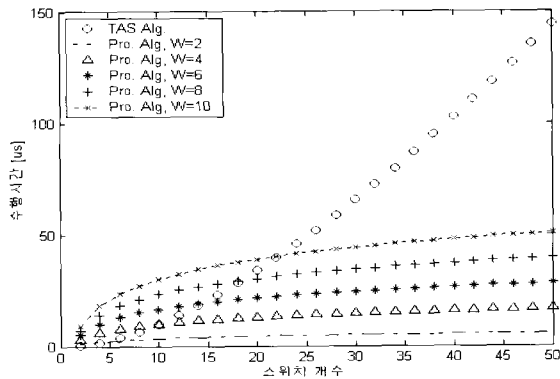


그림 11. OSM의 복잡도 비교 결과.

Fig. 11. Results of complexity comparison OSM.

단계 9 : 광 스위치 $SW_{6,2}$ 의 $M_n = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$ 이다.

단계 10 : 광 스위치 $SW_{6,2}$ 는 하위포트로 입력이 주어졌으며 누화고장이 발생하여 상위출력포트는 누화고장 출력이 하위출력포트는 정상적인 출력이 발생했음을 의미한다. 이는 그림 4의 고장유형 3에 해당된다.

그림 10은 그림 9에 대한 이러한 일련의 과정을 MATLAB (Ver. 6.1)을 이용하여 모의실험한 결과를 나타낸 것이다. 모의 실험은 자기 다른 5개의 파장을 채널로 사용하였으며 서로 다른 파장을 사용하므로 파장 충돌은 없다. 모의실험 결과는 좌측 그림에서는 파장별 고장스위치가 존재하는 위치를 보여주는 부분과 이러한 고장스위치의 고장유형을 보여주는 우측 부분으로 나누어진다. 5개의 파장 중 총 4개의 파장(파장 2,3,4,5)에 설정된 경로에서 고장이 발생한 스위치들이 존재하고 있다. 좌측의 그림에서 파장 2에 의해 설정된 채널에서는 OSM의 두개의 스위치가 누화고장을 일으켰으며 파장 3은 두개, 파장 4는 3개, 파장 5는 1개가 각각 존재함을 확인 할 수 있다. 우측 그림에서는 좌측 그림에서 보인 고장 스위치의 위치 정보와 고장유형을 모의 실험을 통해 확인시켜 주고 있다. 그리고 정상적인 신호의 출력포트 주소와 누화고장에 의해서 발생된 잘못된 출력포트의 주소 정보도 함께 보여 주고 있다.

그림 11은 테스트 기법에 기반을 둔 고장진단 방법을 제안한 Qiao와 Hwang의 TAS(test all switches algorithm) 알고리즘과의 복잡도를 비교하였다. TAS알고리즘은 스위치 개수의 증가에 따른 알고리즘의 수행시간이 급격히 증가하지만, 본 논문에서 제안한 알고리즘은 파장 개수와 스위치 개수가 증가하여도 수행시간의 변화가 적음을 알 수 있다.

IV. 결론

본 논문에서는 최근 광 회로 스위칭과 광 패킷 스위칭의 장점만을 이용하여 WDM(wavelength division multiplexed) 상의 IP 기반을 위한 광 네트워크를 실현시킬 수 있는 기술로 제시되고 있는 광 버스트 스위칭 시스템에서의 고장진단 알고리즘을 제시하였다. 시스템에서 발생하는 고장의 조기진단은 고장에 대한 신속한 대처를 가능하게 하여 망 자원의 낭비를 줄이고 시스템의 신뢰성과 생존성을 높여주

므로 매우 중요한 과제이다. 본 논문에서는 이러한 의미에서 OBS의 스위치 연결관계를 제공하는 OSM에서의 고장진단 기법에 대해서 고찰하였다. 특히 OSM에서 발생할 수 있는 누화고장에 대해 중점 연구하였다. 그리고 제시한 고장진단 알고리즘은 OSM에만 국한되어진 기존의 제한적 테스트 기법과는 달리 고장모델을 대수적으로 제시하였고, OBS 시스템의 메커니즘 분석을 통해 제어부의 BCP정보를 고장진단시 활용하는 해석적인 방법을 제시하였다. 따라서 고장진단시 고장요소들간의 논리적 연산이 가능하게 되어 빠른 연산을 통해 신속하게 고장을 진단할 수 있었다. 또한 OSM의 확장시 VRT만 새로이 구성하면 알고리즘의 변화 없이도 고장진단이 가능하므로 이를 통해 알고리즘 적용의 효율성을 높일수 있었다. 향후 이러한 고장진단 기술의 발전으로 인한 내고장성 기술의 발전은 OBS로 구성된 망의 생존성을 향상시키게 될 것이다. 그러므로 이러한 고장진단 기술은 WDM방식의 OBS기술을 차세대 광 네트워크를 구성하는데 중요한 광 교환 기술로 자리잡을 수 있도록 하는 기반을 제공할 것이다.

참고문헌

- [1] M. Listanti, V. Eramo and R. Sabella, "Architectural and technological issues for future optical internet networks", *IEEE Communications Magazine*, vol. 37, no. 9, pp. 82-92, 2000.
- [2] M.-A. Ali, A. Shami, C. Assi, Y. Ye and R. Kurtz, "Architectural optical for the next-generation networking paradigm: Is optical internet the answer?", *Photonic Network Communications*, vol. 3, no. 1/2, pp. 7-21, 2001.
- [3] 소원호, 노선식, 김영천, 강민호, "차세대 광 인터넷을 위한 광 버스트 스위칭 기술", *전자공학회지*, 제 28 권, 제 9 호, pp. 60-71, 2001.
- [4] C.-L. Wu and T.-Y. Feng, "On class of multistage interconnection networks", *IEEE Trans. on computers*, vol. C-29, No. 8, 1980.
- [5] Y. Pan, C. Qiao and Y. Yang, "Optical multistage interconnection networks: New challenges and approaches", *IEEE Communications Magazine*, vol. 37, no. 2, pp. 50-56, 1999.
- [6] R. Ramaswami and K.-N. Sivaraijan, *Optical networks: A practical perspective*, CA: Morgan-Kaufmann, 2001.
- [7] C. Qiao, "A two-level process for diagnosing crosstalk in photonic dilated benes networks", *Journal of Parallel and Distributed Computing*, vol. 41, no. 1, pp. 53-66, 1997.
- [8] I.-S. Hwang and S.-N. Lee, "Diagnosing crosstalk faults in a class of dilated blocking optical multistage interconnection networks", *Journal of Information Sciences*, vol. 124, no. 1, pp. 59-91, 2000.
- [9] I.-S. Hwang, "Diagnosing symmetry crosstalk faults in dilated benes photonic multistage interconnection networks", *Journal - Chinese Institute of Electrical Engineering*, vol. 9, no. 1, pp. 45-54, 2002.

- [10] S.-J. Wang, "Distributed diagnosis in multistage interconnection networks", *Journal of parallel and distributed computing*, vol. 61, no. 2, pp. 254-264, 2001.
- [11] C. Qiao, "Labeled optical burst switching for IP-over-WDM integration", *IEEE Communications Magazine*, vol. 38, no. 9, pp. 104-114, 2000.
- [12] 김영재, 조광현, "광 다단계 상호연결망의 단일 누화고장에 대한 해석적 고장진단 기법", 제어 · 자동화 · 시스템공학 논문지, 제 8 권, 제 3 호, pp. 256-263, 2002.
- [13] J.-P. Hayes, *Computer architecture and organization*, NY: McGraw-Hill, 1988.
- [14] C.-S. Wu, G.-K. Ma, and B.-S. Lin, "Extended baseline architecture for nonblocking photonic switching", *Journal of Lightwave Technology*, vol. 15, no. 5, pp. 771-778, 1997.
- [15] I. Katzela, G. Ellinas, W.-S. Yoon, and T. E. Stern, "Fault diagnosis in optical networks", *Journal of High speed networks*, vol. 10, no. 4, pp. 269-291, 2001.



김영재

2001년 울산대학교 전기공학과 졸업.
2003년 동대학원 석사. 2003년~현재
㈜아이티 광전송팀 연구원. 관심분야
는 광통신망 시스템(스위칭 및 교환기
분석), OXC기술, 광 패킷교환 및
DWDM 전송망, 이산사건시스템의 관

리제어.



조광현

1993년 한국과학기술원 전기및전자공
학과 졸업. 1995년 동대학원 석사.
1998년 동대학원 박사. 1998년~1999년
동대학원 위촉연구원. 1993년~현재
울산대학교 전기전자정보시스템공학
부 조교수. 관심분야는 이산사건시스

템의 해석 및 관리제어, 통신망 분석 및 제어, 광통신망
시스템(스위칭 및 라우팅), 시스템이론의 바이오정보공학
응용 등.