

# 제한된 광 파장변환 기능을 가지는 WDM망을 고려한 개선된 p-Cycle 기법

정희원 신상현\*, 신해준\*, 김영탁\*

## Enhanced p-Cycles for WDM Optical Network with Limited Wavelength Converters

Sang-Heon Shin\*, Hae-Joon Shin\*, Young-Tak Kim\* Regular Members

요 약

본 논문은 제한된 범위의 광 파장 변환기능을 가진 WDM (Wavelength Division Multiplexing) 망에서의 신속한 장애 복구에 적용될 수 있도록 개선된 p-cycle (preconfigured protection cycle) 기법을 제안한다. 개선된 p-cycle 기법은 단방향 멀티캐스팅이나 양방향으로 연결을 가지지만 비대칭적인 대역폭을 사용하는 광대역 멀티미디어 통신에서 사용되는 단방향 연결을 수용할 수 있도록 수정하였다. 본 논문에서는 개선된 p-cycle 기법을 광 파장 변환기능이 제한적인 WDM 망에서 적용하고 그 결과를 분석하였다. 개선된 p-cycle 알고리즘은 광 파장 변환 기능이 제한적인 WDM망에서 기존의 방안보다 우수한 성능을 보여준다.

ABSTRACT

In this paper, we propose an enhanced p-cycles (preconfigured protection cycles) scheme for fast restoration in WDM (Wavelength Division Multiplexing) optical mesh network with limited wavelength conversion for fast restoration. We enhanced the p-cycles to accommodate uni-directional connections to be used in uni-directional multicasting or asymmetric broadband multimedia communications with bi-directional connectivity. We applied it to WDM network with limited wavelength conversion and analyzed the result. The analysis results show that the enhanced p-cycle algorithm provides better performance in WDM optical networks with limited wavelength converter.

### I. 서 론

급격한 데이터 트래픽의 증가에 따라 신속한 장애 복구 기능을 가지는 광대역 전송망이 필요하게 되었다. 최근 많은 발전을 보이고 있는 DWDM (Dense-mode WDM) 기술은 이러한 광대역 통신망을 구축하는데 사용될 수 있는 것으로 기대된다. 이러한 넓은 대역폭을 가지는 DWDM 시스템이 전송망에서 널리 구축됨에 따라 네트워크의 생존성이 보다 중요해지고 있다. 네트워크의 생존성이란 장애가 발생했을 때

데이터 트래픽이 받는 영향이 최소화 될 수 있도록 장애가 신속하게 복구될 수 있는 능력을 의미한다.

링형 구조와 그물형 구조를 가지는 네트워크들에 적용하기 위해서 다양한 장애복구/보호절체 기법들이 제안되었다. 링 기반의 보호절체 기법은 간단한 스위칭 구조를 사용하여 50~60 ms 이내에 복구를 수행하지만, 100% 이상의 예비대역폭을 필요로 한다. 따라서 링 기반의 보호절체 기법은 신속하기는 하지만 대역폭 사용에 있어서 효율적이지 못하다. 그물형 기반의

\* 영남대학교 대학원 정보통신공학과 차세대 네트워크(ANT) 연구실  
논문번호 : 020415-0930, 접수일자 : 2002년 9월 30일

복구 기법들은 각 링크의 예비 대역폭이 다른 복구 경로에 의해서 재사용될 수 있기 때문에 대역폭 사용에 있어서는 보다 효율적이다. 하지만 경로 재설정에 필요한 여러 가지 절차들 때문에 링 기반의 보호절체 기법만큼 신속하지는 못하다[1].

오랜 기간동안 링 기반 보호절체 기법의 신속함과 그물형 기반 장애복구 기법의 효율적인 대역폭 사용은 동시에 구현될 수 없는 것으로 간주되어 왔다. 하지만 p-cycle 복구 기법은 링 기반 보호절체나 그물형 기반 장애복구와 다른 접근 방법을 취함으로써 신속한 복구 시간과 대역폭 사용의 효율성을 동시에 가질 수 있도록 제안되었다[2-4]. p-Cycle 복구 기법에서는 장애가 발생한 링크에 인접한 두 노드들만이 보호절체를 위한 조치를 취하면 되므로 링 기반의 보호절체 기법만큼 신속하게 복구가 이루어질 수 있다. 또한 장애에 대비한 예비 대역폭의 배치가 전체 네트워크를 고려하여 최적화된 방식으로 배치되므로 그물형 네트워크에서 사용되는 스패น(span) 단위의 자동복구 방법만큼 효율적이다.

하지만, 기존에 제안된 p-cycle 복구 방법들은 WDM 광 네트워크에서의 파장 변환 제약을 충분히 고려하지 못하였다. 또한 단방향 연결을 사용하는 경우와 양방향 연결성을 가지지만 양방향으로 비대칭적인 대역폭을 사용하는 연결의 경우에 대한 고려도 반영되지 않았다. 본 논문에서는 광파장 변환 기능이 제한적인 WDM 망에서의 신속한 장애복구를 위해 개선된 p-cycle 기법을 제안하고자 한다. 개선된 p-cycle 기법은 단방향 연결들과 비대칭적인 대역폭을 사용하는 양방향 연결들을 잘 수용할 수 있도록 단방향 연결 개념을 적용하였다. 개선된 방안을 광파장 변환 기능이 제한적인 WDM망에 적용하고 시뮬레이션을 통하여 그 결과를 분석하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 기존에 제안된 p-cycle 기법들을 설명하고 그 특성을 분석한다. 3장에서는 단방향 연결을 지원할 수 있도록 개선된 p-cycle을 방향성 그래프(directed graph)에 적용한다. 4장에서는 개선된 p-cycle을 광파장 변환이 자유로운 WDM 망, 광파장 변환 기능이 제한적인 WDM 망, 광파장 변환 기능이 제공되지 않는 WDM 망에 적용한다. 5장에서는 본 논문에서 제안한 기법을

성능을 분석하고 평가하며, 6장에서 결론을 맺는다.

## II. p-Cycle 기반의 장애복구

### 1. p-Cycle의 개념

그물형 네트워크에서의 장애 복구를 위해 예비 대역폭을 사이클 형태로 사전에 배치하는 방안이 [2]에서 제안되었다. 이 방안은 p-cycle (preconfigured protection cycle)이라고 불리는데 사전에 구성된 사이클들을 조합하는 것에 기반하고 있다. (그림 1)은 개개의 p-cycle이 장애 복구에 사용되는 방법을 보여주고 있다. p-Cycle은 사이클을 구성하는 스패에 발생하는 장애와 사이클을 구성하는 스패는 아니지만 양 끝 노드가 사이클에 포함되는 스패(straddling span)에 발생하는 장애에 대해서 모두 보호할 수 있다. (그림 1-a)는 장애에 대비하여 사전에 구성된 사이클(p-cycle)의 예를 보여준다. (그림 1-b)은 사이클을 구성하는 span에 장애가 발생하였을 때 사이클의 나머지 부분을 이용하여 장애를 복구하는 과정을 보여주고 있다. 또한 p-cycle은 사이클에 포함되는 스패는 아니지만 양 끝 노드가 사이클에 포함되는 스패도 장애로부터 보호할 수 있다. (그림 1-c)와 (그림 1-d)에서는 동일한 p-cycle이 걸쳐진 스패들( $l_{2-4}$ 와  $l_{3-4}$ )에 발생한 장애를 복구하기 위해서 사용되었다. 그러므로 p-cycle에서 장애 복구를 위해서 사용되는 예비 대역폭은 전통적인 링 기반의 자동복구 방식보다 훨씬 많이 공유될 수 있다.

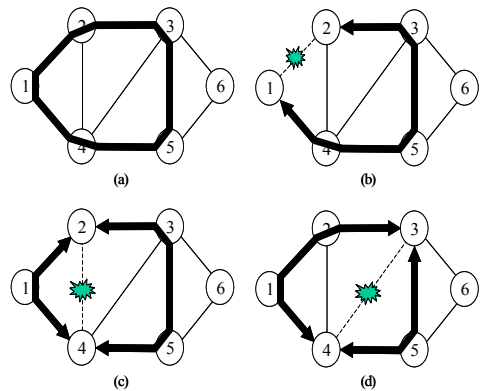


그림 4 p-Cycle을 이용한 장애 복구

2. WDM 망에서의 p-cycle

D.A. Schupke 등은 광파장 변환 기능이 자유롭거나 또는 광파장 변환 기능이 전혀 없는 WDM 망에 p-cycle 개념을 적용할 수 있도록 확장하였고[5], p-cycle을 적용하기 위해서 WDM 망을 두 가지 종류로 구분하였다. 즉, 광파장 변환 기능이 전혀 없는 망은 WP(Wavelength Path) 네트워크라고 하며, 광파장 변환에 아무런 제약을 받지 않는 망을 VWP(Virtual Wavelength Path) 네트워크라고 한다. WDM 노드를 연결하는 단방향 링크는 광 파이버를 나타낸다. 만약 VWP WDM 망에서 사용되는 노드들이 완전한 광파장 변환 기능을 제공한다면, lightpath는 출력 파이버에 비어있는 광 채널이 있기만 하면 출력 파이버로 스위칭 될 수 있다. 그러므로 사이클 구성을 위한 최적화 모델은 용량(대역폭)의 최소 단위가 파장( $\lambda$ )이 된다는 점을 제외하면 변경 없이 사용될 수 있다.

만약 WP WDM 망에서 사용되는 노드들이 광파장 변환 기능이 전혀 없는 경우라면, lightpath는 출력 파이버에 지정된 광파장이 비어있는 경우에만 출력 파이버로 스위칭 될 수 있다. WP 네트워크는 VWP 네트워크에서 광파장이 연속성을 가져야만 하는 제약을 추가적으로 가지는 경우로 다루어질 수 있다. 파장 변환이 불가능하기 때문에 사용자 연결을 위한 working 링크와 장애에 대비한 p-cycle은 양방향으로 서로 다른 파장을 사용해야만 한다. 만일 working 링크의 파장이 양방향으로 서로 다르고 p-cycle이 상보적인 파장을 가질 수 있다면, 두 개의 p-cycle을 이용하여 사이클에 포함되는 양방향 working 링크의 장애를 복구할 수 있다. 따라서 working 경로와 p-cycle은 단방향으로 취급되어지지만 각 스패에서의 대역폭 사용은 대칭적인 것으로 간주된다.

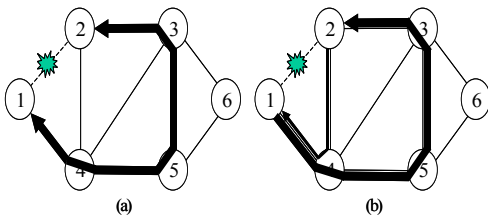


그림 6 단방향 사이클에 의한 장애 복구

3. 방향성 그래프(directed graph)에서의 p-cycle

p-Cycle 개념은 기본적으로 무방향성 그래프(undirected graph)에서 착안되었다. 즉 각 스패를 지나는 연결은 양방향 연결성을 가지며 양방향으로 같은 대역폭을 사용하는 것으로 취급된다. 네트워크 그래프로부터 기본 사이클(cycle)들을 찾아내기 위해 사용되는 Johnson 알고리즘[6]은 방향성이 구분된 사이클들을 찾아낼 수 있음에도 불구하고, p-cycle에서는 기본 사이클들의 방향성 정보를 사용하지 않으며 p-cycle 자체도 방향성을 가지지 않는다. 사이클에 포함되는 스패들과 사이클에 걸쳐진 스패들을 보호하기 위한 p-cycle은 장애가 발생했을 때 양방향으로 동일한 대역폭을 가지는 양방향의 대체 경로를 제공한다.

이러한 가정은 실제 네트워크 환경에서는 실용적이지 못하다. 많은 경우의 양방향 연결에서 요청 대역폭은 전송 방향에 따라 달라질 수 있으며 단방향 연결이 사용되기도 한다. 특히 point-to-multipoint (p-to-mp) multicasting에서는 단방향 전송 경로들이 구성되어야 한다. 또한 GMPLS(Generalized Multi-Protocol Label Switching)에서는 양방향 및 단방향 LSP(Label Switched Path)를 사용할 수 있도록 지원한다[7]. 따라서 스패에서의 대역폭 사용은 각 방향(또는 각 링크)에 따라 다를 수 있다. 그러므로 p-cycle 개념은 단방향 연결을 지원할 수 있도록 개선되어야 한다. 만약 단방향성의 p-cycle이 사용된다면, 하나의 스패 장애에 대해서 서로 다른 복구 경로가 제공될 수 있다. (그림 2)에서 스패  $l_{1-2}$ 는 비대칭적인 대역폭 사용량을 가지며 edge  $E_{1-2}$ 가 edge  $E_{2-1}$ 보다 큰 대역폭을 사용하고 있다. 방향성을 가지지 않는 p-cycle이 사용된 경우에는 양방향으로 동일한 대역폭을 가지는 한 개의 p-cycle이 장애 복구를 위해서 제공된다. 반면 방향성을 가지는 p-cycle이 사용된 경우에는 두 개의 p-cycle이 장애 복구를 위해서 제공된다. 하나는 edge  $E_{1-2}$ 를 보호하기 위해서  $1 \rightarrow 4 \rightarrow 5 \rightarrow 3 \rightarrow 2 \rightarrow 1$ 의 경로를 지나며 큰 대역폭을 가지고, edge  $E_{1-2}$ 를 보호하기 위한 또 다른 p-cycle은  $2 \rightarrow 4 \rightarrow 1 \rightarrow 2$ 의 경로를 지나며 작은 대역폭을 가진다.

p-Cycle을 WDM 망에 적용하기 위해서 대상 네트워크를 방향성 그래프로 모델링하는 방안은 [5]에서 이미 시도되었다. 그러나 Schupke가 유향 그래프 개념을 사용한 것은 단지 광파장 변환 기능이 없는 WP 네트워크에서 양방향 working 연결에 대한 장애 복구를 위해서, working 연결의 파장이 양방향으로 서로 다르고 p-cycle이 상보적인 파장을 가진다고 가정했기 때문이었다. 하지만 양방향 연결에서도 전송 방향에 따라 서로 다른 대역폭이 사용될 수 있다는 점과 단방향 연결에 대한 점은 고려되지 않았다.

### III. 방향성 그래프에 적용할 수 있는 개선된 p-cycle

네트워크에서 각 스패는 반대방향을 가지는 edge의 쌍으로 구성되며, edge는 하나 혹은 그 이상의 광 파이버들을 포함한다. 네트워크는 방향성을 가지는 유향 그래프  $G=(V, E)$ 로 표현될 수 있다.  $V$ 는 노드들의 집합을 표현하며,  $E$ 는 방향성이 있는 edge들의 집합을 나타낸다.  $P$ 는 네트워크에 존재하는 모든 p-cycle(또는 기본 사이클)의 집합을 나타낸다.  $s_j$  와  $w_j$  는 각각 edge  $j$ 에서의 working 링크와 예비 링크의 수를 나타낸다.  $n_i$  는 p-cycle 배치 시에 필요한 사이클  $i$ 의 개수를 나타낸다.  $x'_{i,j}$  는 한 개의 p-cycle  $i$ 가 edge  $j$ 에 장애가 발생했을 때 제공할 수 있는 대체 경로의 수를 의미한다.  $d_{i,j}$  는 한 개의 p-cycle  $i$ 를 구성하기 위해서 edge  $j$ 에서 필요한 예비 링크의 숫자를 의미한다.  $c_j$  는 edge  $j$ 의 비용을 표현한다.

목적식은 다음과 같이 표현된다.

$$\text{Minimize } \sum_{j \in E} c_j s_j \quad (1)$$

subject to :

$$s_j = \sum_{i \in P} d_{i,j} n_i \quad \forall j \in E \quad (2)$$

$$w_j \leq \sum_{i \in P} x'_{i,j} n_i \quad \forall j \in E \quad (3)$$

$$n_i \geq 0 \quad \forall i \in P \quad (4)$$

계수  $x'_{i,j}$  와  $d_{i,j}$  는 사이클 세트  $P$ 에 속하는 모든 사이클에 대해서 각각 계산된다. 만약 cyc

le  $i$ 가 span  $j$ 를 지나가면  $d_{i,j}$  는 1이 되며, 그렇지 않으면 0이 된다.  $x'_{i,j}$  는 0 또는 1의 값을 가진다. [2]와는 대조적으로 본 논문에서는 단방향성의 p-cycle을 사용하므로  $x'_{i,j}$  의 값을 결정하는 조건은 [2]의  $x_{i,j}$  를 위한 조건과는 다르다. 또한 이는 WP망에의 적용을 위해 단방향의 working 패스와 p-cycle을 사용했던 [5]의 조건과도 다르다. 만약 장애가 발생한 edge의 양 끝 노드가 사이클 상에 있지 않으면  $x'_{i,j}$  는 0이 된다. 만약 장애가 발생한 edge의 양 끝 노드가 모두 사이클 상에 있으면 다시 다음의 두 가지 경우로 나누어 생각할 수 있다. (i) 두 노드가 사이클 상에서 서로 이웃하지 않는 경우(case 1)와 (ii) 두 노드가 사이클 상에서 서로 이웃하는 경우(case 2)이다.

Case 1:  $x'_{i,j}$  는 1

Case 2: 만약 사이클  $i$ 가 edge  $j$ 를 지나가면  $x'_{i,j}$  는 1, 아니면 0. ( $j'$ 는 edge  $j$ 의 반대편 edge를 의미한다.)

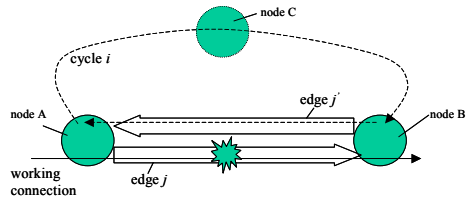


그림 8 반대 방향 edge를 지나는 사이클에 의한 장애 복구

만약 양 끝 노드들이 사이클 상에서 서로 이웃하지 않는다면  $x'_{i,j}$  는 1이다. 단방향성의 p-cycle을 사용하므로, 사이클에 걸쳐진 edge는 한 개의 p-cycle에 의해서 단지 한 방향으로만 대체 경로를 제공받을 수 있으며, 동일한 p-cycle을 이용해서는 반대 방향으로의 대체 경로를 제공받을 수는 없다. 만약 양 끝 노드들이 사이클 상에서 서로 이웃하고 사이클  $i$ 가 edge  $j$ 를 지나가면  $x'_{i,j}$  는 1이고, 그렇지 않으면 0의 값을 가진다. Edge  $j'$ 는 edge  $j$ 와 동일한 스패에 속하지만 방향이 정반대인 edge를 말한다. 이러한 조건은 [2]과 [5]에서 전혀 고려되지 못했었다. (그림 3)은 edge  $j$ 가 edge  $j'$ 를 지나는 사이

클  $i$ 에 의해서 장애로부터 보호될 수 있음을 설명하고 있다. edge  $j$ 에 장애가 발생했을 때, 노드 A로부터 노드 B로의 데이터 트래픽은 패스 A-C-B를 이용하도록 노드 A에서 우회되어야만 한다. 이 패스는 사이클  $i$ 를 구성하며 edge  $j$ 를 보호할 수 있다. 하지만 사이클  $i$ 는 edge  $j'$ 를 지나갈 뿐이며, edge  $j$ 를 지나가지는 않는다. Edge  $j$ 를 지나가는 사이클(A-B-C)는 edge  $j'$ 를 장애로부터 보호할 수 있지만 edge  $j$ 를 보호하지는 못한다. 그러므로 [5]에서 제안된 WDM 망에서의 p-cycle을 위한 Schupke의 모델은 수정되어야만 한다.

#### IV. WDM 망에서의 p-cycle 적용

광파장 변환 기능은 이용할 수 있는 파장의 사용률을 높여준다. 하지만 광파장 변환기는 비용이 대단히 비쌀뿐 아니라 구현기술이 완전하게 개발되지 않았기 때문에, 가까운 시일 안에 광네트워크의 모든 OXC(Optical cross-connector)에서 완전한 광파장 변환기능이 제공되기를 기대하기는 어려운 것으로 예상되며, 변환 용량을 줄여서 광네트워크 노드의 비용을 낮추기 위한 방안으로서 제한된 범위의 광파장 변환기능이 시도되어지고 있다[1, 8, 9]. 본 논문에서는 WDM 망을 (i) 완전한 광파장 변환기능이 제공되는 경우, (ii) 제한된 범위의 광파장 변환기능이 제공되는 경우, (iii) 광파장 변환기능이 제공되지 않는 경우의 세 가지 범주로 나누어서 접근한다.

##### 1. 완전한 광파장 변환 기능을 가진 WDM 망

완전한 광파장 변환 기능을 가진 WDM 망이란 파장 변환에 아무런 제약도 받지 않는 경우이다. lightpath는 출력 파이버에 비어있는 광채널이 있지만 하면 출력 파이버로 스위칭될 수 있다. 앞 절에서 설명된 사이클 구성을 위한 최적화 모델은 용량의 최소 단위가 파장( $\lambda$ )이 된다는 점을 제외하면 변경 없이 사용될 수 있다. 식 (5)-(7)은 식 (1)-(3)과 동일하며 식 (8)은 용량(대역폭)의 최소 단위가 파장이 됨을 나타낸다.

$$\text{Minimize } \sum_{j \in E} c_j s_j \quad (5)$$

subject to :

$$s_j = \sum_{i \in P} p_{ij} n_i \quad \forall j \in E \quad (6)$$

$$w_j \leq \sum_{i \in P} x'_{ij} n_i \quad \forall j \in E \quad (7)$$

$$n_i \in \{0, 1, 2, \dots\} \quad \forall i \in P \quad (8)$$

##### 2. 제한된 광파장 변환 기능을 가진 WDM 망

각 노드가 제한된 범위의 광파장 변환 기능을 가진 WDM 망에 p-cycle을 적용하기 위해서 몇 가지 가정을 도입하였다. 장애가 발생하지 않은 정상적인 상황에서 working 트래픽을 위한 연결 설정 요청은 광파장 변환 기능을 사용하지 않고 처리된다. 그러므로, 중단간 파장의 연속성에 대한 제약이 고려되어야만 한다. 광파장 변환 기능은 링크 장애 복구와 같은 긴급 상황에서 사용된다. 때때로 사이클은 광파장 변환 기능을 사용하지 않고 비어있는 파장들만을 사용해서 구성될 수도 있다. 하지만 장애가 어느 edge 또는 어느 파장 채널에 발생할지 미리 알 수 없기 때문에, 이러한 사이클은 장애 복구를 위한 p-cycle로 사용될 수 없다. p-cycle은 지나가는 모든 working edge와 파장 채널들을 장애로부터 보호할 수 있어야만 한다.

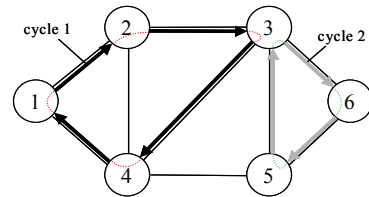


그림 10 광파장 변환 기능을 이용한 p-cycle의 구성

(그림 4)는 광파장 변환 기능을 사용한 p-cycle의 구성 예를 보여주고 있다. 사이클 1과 2는 모두 노드 3을 지나가며, 노드 3은 장애가 발생하기 전에 사이클 1과 2를 위한 파장 변환 기능을 포함한 스위칭 준비를 해야만 한다. 만약 노드 3의 광파장 변환 용량이 2라면 노드 3을 지나가는 더 이상의 p-cycle은 허용될 수 없

다. 물론 어떤 장애가 발생하고 p-cycle이 동작하기 전까지는 실제로 광파장 변환이 일어나지 않는다. 하지만, 파장 변환기는 p-cycle 1과 2를 위해 할당되어져 있어야만 하며, 이 파장 변환기와 광 경로들은 다른 용도로 사용될 수 없다.

앞 절에서 기술된 사이클을 구성하기 위한 식들은 파장 변환에 관한 제약만을 추가하면 그대로 사용될 수 있다.  $t_k$  는 노드 k가 가지는 파장 변환기의 용량을 나타내고,  $y_{i,k}$  는 한 개의 p-cycle i를 만들기 위해서 노드 k에서 필요한 파장 변환기의 용량을 나타낸다. 만약 사이클 i가 노드 k를 지나가면  $y_{i,k}$  는 1이 되고, 지나가지 않으면 0이 된다. 각 노드에서의 광파장 변환에 대한 제약은 다음의 식으로 표현된다.

$$t_k \geq \sum_{i=1}^{|P|} y_{i,k} n_i \quad \forall k \in V \quad (9)$$

식 (1)-(3)과 (8)는 광파장 변환 기능이 제한된 네트워크에서도 그대로 사용된다. 식 (9)의 제약 때문에 광파장 변환기능이 p-cycle들을 구성하기에 너무 작은 경우에는 해를 찾을 수 없을 수도 있다.

그런데, 만약 p-cycle을 구성하기 위해서 식 (9)의 제약 조건을 추가하지 않는다면, 반대로 p-cycle을 배치하기 위해서 각 노드에서 필요한 파장 변환기의 용량을 계산해 낼 수가 있다.

$$t_k = \sum_{i=1}^{|P|} y_{i,k} n_i \quad \forall k \in V \quad (10)$$

식 (10)은 식 (2)와 매우 유사하다는 점에 주목하여야 한다. 식 (2)는 각 edge를 지나가는 p-cycle의 총 용량(또는 대역폭)을 의미하며, 식 (10)은 각 노드를 지나가는 p-cycle의 총 용량을 의미한다. 사이클에서 노드의 총 숫자는 edge의 총 숫자와 동일하므로,  $s_j$ 의 합은  $t_k$ 의 총합과 동일하다.

$$\sum_{j=1}^{|E|} s_j = \sum_{k=1}^{|V|} t_k \quad (11)$$

그러므로 파장 변환기는 p-cycle들을 구성하기 위해서 사용된 파장(lambda)의 수만큼 필요함을 알 수 있다.

p-Cycle 기반 장애 복구 방식에서 working 경로 대역폭에 대한 예비 경로 대역폭의 비율은 p-cycle의 최대 길이와 밀접한 관련이 있다 [5, 10]. 만약 허용된 최대 p-cycle 길이가 짧다

면 (Case 1), working 경로 대역폭보다 많은 예비 경로 대역폭이 필요하다. 하지만 허용된 최대 p-cycle의 길이가 매우 긴 경우에는 (Case 2), p-cycle은 단지 working 경로 대역폭의 50%만으로도 구성될 수 있다. 따라서 case 1과 같은 경우에는 working 파장(대역폭)보다 많은 개수의 파장 변환기가 필요하고 case 2과 같은 경우에는 p-cycle을 구성하기 위해서 단지 working 파장(대역폭)의 절반 개수의 파장 변환기만이 필요하게 된다.

### 3. 파장 변환기능이 없는 WDM 망

Schupke는 working 트래픽을 위한 연결과 p-cycle이 양방향으로 서로 다른 파장을 가지는 상황을 가정했다[5]. 즉, working 경로를 위해 할당된 파장에 대해서는 반대 방향의 같은 파장이 사용되지 않는다는 것이다. 이것이 가능하기 위해서는 WDM 교환기의 제어 모듈이 연결의 각 방향으로 서로 다른 파장을 할당해주고 반대 방향의 working 패스와 동일한 파장이 사용되지 않도록 조절할 수 있어야 한다. 이것은 구현하기 아주 어려운 뿐 아니라 각 span에서 대역폭이 비대칭적으로 사용될 경우, 이 문제는 더욱 복잡해지게 된다. 그러므로 다른 접근 방법이 요구되어진다.

이러한 경우에는 FXC(Fiber cross-connector)와 WXC(Wavelength cross-connector)로 구성된 계층적인 OXC 구조[8]와 다중 파이버 링크를 사용한 파이버 레벨에서의 p-cycle이 보다 적합하다고 생각된다. 이 방식에서 FXC는 파이버 레벨의 p-cycle을 구성하기 위해서 사용되며, WXC는 working 패스를 제공하기 위해서 사용된다. OXC의 기능을 FXC와 WXC로 나누는 것은 상당한 비용절감을 가져온다. 또한 계층적인 OXC 구조는 파이버 레벨의 p-cycle 개념과도 잘 일치한다.

파이버 레벨 p-cycle에서 edge는 장애 발생 시 파이버 단위로 자동복구가 이루어지게 된다. 그러므로 장애복구를 위한 연결의 기본단위가 광 파이버가 된다는 점을 제외하면 식 (5)-(8)은 그대로 사용될 수 있다.

## V. 시뮬레이션 결과

이 장에서는 제안된 단방향성의 p-cycle 개념

과 이를 WDM 광 네트워크에 적용하는 방안에 대해 분석하고 평가한다. 주어진 네트워크에서 기본 사이클을 찾아내고 3장과 4장에서 설명된 계수들을 계산하기 위해서 MS Visual C++ 6.0을 사용하였으며, MIP(Mixed Integer Program)을 풀기 위해서는 CPLEX 7.5[11]를 사용하였다.

1. 유향 그래프에 적용된 단방향성 p-cycle

(그림 5)는 6개의 노드와 9개의 양방향 span (18개의 edge)로 구성된 시험망을 보여주고 있다. WDM망으로 가정하였으며 대역폭 할당이 파장( $\lambda$ ) 단위로 이루어진다고 가정하였다. 먼저 working 용량을 각 스패마다 대칭적으로 할당하고, 각 스패의 한쪽 edge에 할당된 working 용량만을 점차적으로 줄여나가는 방법으로 비대칭적인 working 용량 배치를 만들었다.

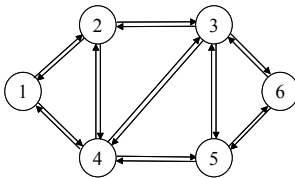


그림 13 시험망의 구조

(그림 6)은 시뮬레이션 결과를 보여주고 있으며, 비대칭 비율은 각 edge쌍들간의 working 용량의 차이를 비율로 표현한 것이다. 비대칭 비율(asymmetric ratio)이 증가함에 따라 네트워크 전체의 working 용량은 감소하며, 단방향 p-cycle을 사용할 경우 장애 복구에 필요한 예비 용량도 감소한다. 하지만 방향성을 가지지 않는 (양방향성을 가지는) p-cycle을 사용하는 경우에는 장애 복구에 필요한 예비 용량이 감소하지 않는다.

이 시뮬레이션에서는 비대칭적인 대역폭 사용 환경을 만들기 위해서 working 용량을 줄이는 방법을 사용하였으므로, 비대칭 비율이 증가함에 따라 네트워크 전체의 working 용량은 감소하게 된다. 양방향성 p-cycle을 사용했을 경우에, 하나의 edge에 장애가 발생하는데 대해서 100% 장애 복구가 가능하도록 하기 위해 p-cycle을 구성하는데 필요한 총 예비용량은 비대칭 비율에 상관없이 변화하지 않는다. 양방향성의 p-cycle은 스패의 각 방향이 동일한 대역폭을 사용한다고 가정하고 두 방향 모두에 대해서 동

일한 예비 대역폭을 제공하므로 이러한 결과는 타당한 것이다. 비록 하나의 edge에서 사용되는 대역폭이 감소하더라도, 양방향성의 p-cycle은 이를 적절히 처리할 수 없다. 그러므로 이러한 경우에 양 방향의 edge중에서 큰 대역폭을 수용할 수 있는 양방향성의 p-cycle이 항상 제공된다. 하지만 단방향성의 p-cycle은 이러한 비대칭적인 대역폭 사용시에 적절히 대처할 수 있다.

<표 3> 시뮬레이션에서 사용한 각 링크 용량

링크	비대칭 비율					
	0%	10%	20%	30%	40%	50%
$l_{1-2}$	5	5	5	5	5	5
$l_{2-1}$	5	4	4	3	2	2
$l_{1-4}$	8	8	8	8	8	8
$l_{4-1}$	8	7	5	6	6	4
$l_{2-3}$	10	10	10	10	10	10
$l_{3-2}$	10	9	7	7	6	5
$l_{4-2}$	5	5	5	5	5	5
$l_{2-4}$	5	4	4	3	3	3
$l_{4-3}$	12	12	12	12	12	12
$l_{3-4}$	12	11	10	9	8	6
$l_{5-3}$	5	5	5	5	5	5
$l_{3-5}$	5	4	3	3	3	3
$l_{3-6}$	9	9	9	9	9	9
$l_{6-3}$	9	8	8	7	5	4
$l_{4-5}$	5	5	5	5	5	5
$l_{5-4}$	5	5	5	4	3	3
$l_{5-6}$	5	5	5	5	5	5
$l_{6-5}$	5	5	5	3	2	2

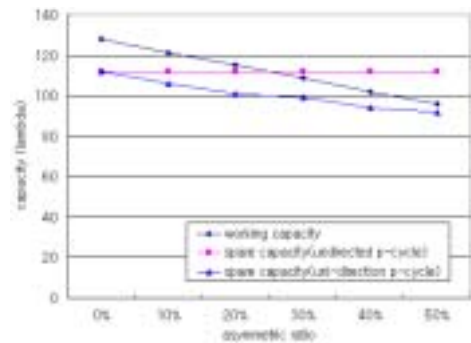


그림 14 비대칭 비율에 따른 예비 대역폭 요구량

2. 제한된 광파장 변환기능을 가지는 WDM 망에서 요구되는 변환기의 수

<표 2>은 제한된 광파장 변환 기능을 가지는 WDM 망에서 p-cycle을 구성하기 위해서 필요한 파장 변환기의 용량을 예비 용량( $\lambda$ )과 비교해서 나타내고 있다. 시뮬레이션 결과로부터 필요한 파장 변환기의 용량이 p-cycle에 의해 사용되는 파장( $\lambda$ )의 수와 같다는 것을 알 수 있는데, 이것은 p-cycle을 구성하는데 필요한 파장 변환기의 수는 모든 p-cycle에 의해 사용되는 파장(용량)의 총 합과 같다는 식 (11)과 일치하다.

표 4 필요한 파장 변환기의 수와 예비 용량과의 비교

Case (asymmetric ratio)	working capacity	p-cycle		uni-directional p-cycle	
		spare capacity	wavelength converter	spare capacity	wavelength converter
1 (0%)	128	112	112	112	112
2 (10%)	121	112	112	106	106
3 (20%)	115	112	112	101	101
4 (30%)	109	112	112	99	99
5 (40%)	102	112	112	94	94
6 (50%)	96	112	112	92	92

(그림 7)은 각 노드에 할당된 working 용량과 예비 용량, 그리고 필요한 파장 변환기의 수를 보여준다. (그림 7)의 시뮬레이션을 위해서 <표 2>의 case 1 (비대칭 비율 0%)에 해당하는 working 용량을 사용하였다. 다른 case들에 대해서도 유사한 결과가 얻어졌으며, 그 중 case 1의 결과만을 나타내었다. 이 그래프에서 working 용량은 각 노드에 들어오고 나가는 대역폭의 총합을 의미하고, 예비 용량은 p-cycle을 구성하기 위해서 사용되는 각 노드에 들어오고 나가는 대역폭의 총합을 의미한다. 따라서 working 용량과 예비 용량은 네트워크 전체 관점에서 보면 두 번씩 합계에 포함되게 된다. p-cycle은 링 형태이므로, 노드에 들어오는 예비 대역폭은 노드에서 나가는 대역폭과 항상 같으며, 필요한 파장 변환기의 수는 각 노드에서 필

요한 예비 용량( $\lambda$ )의 절반이 된다. 시뮬레이션 결과로부터 필요한 파장 변환기는 각 노드에 거의 균일하게 분포됨을 알 수 있다. 이는 비슷한 성능을 가지는 WDM 교환기를 사용하여 네트워크를 구축할 경우 대단히 바람직한 특징이라 할 수 있다.

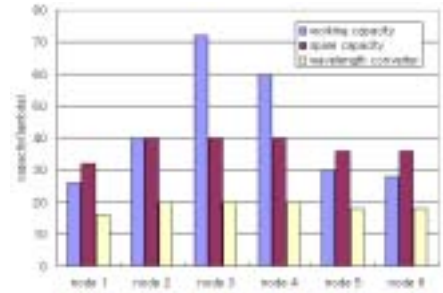


그림 16 각 노드에서의 working/예비 용량과 필요한 파장 변환기의 수

VI. 결론

본 논문에서는 방향성 그래프에서 사용될 수 있도록 p-cycle 장애 복구 기법을 개선하였다. 각 스팬이 비대칭적인 대역폭 사용량을 가지는 경우, 단방향성의 p-cycle 기법이 기존의 양방향성의 p-cycle보다 효과적으로 사용될 수 있다. 단방향성의 p-cycle 개념은 (i) 완전한 파장 변환 기능을 가지는 경우, (ii) 제한된 범위의 파장 변환 기능을 가지는 경우, (iii) 파장 변환 기능이 없는 경우의 3가지 WDM 망에 적용되었다. 시뮬레이션 결과로부터 방향성 있는 그래프를 위한 개선된 p-cycle이 기존의 방향이 없는 그래프를 기반으로 한 p-cycle보다 성능이 향상되었음을 알 수 있었다. 개선된 단방향성의 p-cycle은 각 노드가 제한된 개수의 파장 변환기를 가지는 WDM 망에도 효과적으로 적용될 수 있다.

참고문헌

[1] Ornan Gerstel, Rajiv Ramaswami, Optical Layer Survivability An Implementation Perspective, IEEE JSA C, Vol. 18, No. 10, October 2000.



[2] Wayne D. Grover, Demetrios Stamatelakis, Cycle-oriented distributed preconfiguration: ring-like speeded with mesh-like capacity for self-planning network restoration, ICC 98, 1998.

[3] W.D. Grover, D.Stamatelakis, Bridging the ring-mesh dichotomy with p-cycles, DCRN 2000, 2000.

[4] Wayne Grover, John Docucette, Matthieu Clouqueur, Dion Leung, Demetrios Stamatelakis, New Options and Insights for Survivable Transport Networks, IEEE Communications Magazine, Jan. 2002.

[5] D.A. Schupke, C.G. Gruber, A. Autenrieth, Optimal Configuration of p-Cycles in WDM Networks, IC C2002, 2002.

[6] Donald B. Johnson, Finding All The Elementary Circuits of a Directed graph, SIAM J. Comput, Vol. 4, No. 1, 1975.

[7] Eric Mannie et al., Generalized Multi-Protocol Label Switching (GMPLS) Architecture, IETF Internet Draft, March 2002.

[8] Yinghua Ye, Sudhir Dixit, Mohamad Ali, On Joint Protection/Restoration in IP-Centric DWDM-Based Optical Transport Networks, IEEE Communication Magazine, June 2000.

[9] Zhensheng Zhang, James Fu, Dan Guo, Leah Zhang, Lightpath Routing for Intelligent Optical Networks, IEEE Network Interactive, July 2001.

[10] D. Stamatelakis, W.D. Grover, Theoretical Underpinnings for the Efficiency of Restorable Networks Using Preconfigured Cycles, IEEE Transactions on Communications, Vol. 48, No. 8, August 2000.

[11] CPLEX 7.5 User's manual, <http://www.cplex.com>.

신 상 현(Sang-Heon Shin)

정회원



1998년 2월 : 영남대학교 전자공학과 졸업  
 2000년 2월 : 영남대학교 전자공학과 공학석사  
 2000년 3월~현재 : 영남대학교 정보통신공학과 박사과정

<주관심분야> Network Fault Restoration, Optical Network, NGI, MPLS/GMPLS

신 해 준(Hae-Joon Shin)

정회원



1997년 2월 : 영남대학교 전자공학과 졸업  
 1999년 2월 : 영남대학교 전자공학과 공학석사  
 2003년 2월 : 영남대학교 정보통신공학과 공학박사

<주관심분야> Network Fault Restoration, High-speed Telecommunication Networking, NGI, MPLS/GMPLS, Optical Network

김 영 탁(Young-Tak Kim)

정회원



1983년 2월 : 영남대학교 전자공학과 졸업  
 1985년 2월 : 한국과학 기술원 전기 및 전자공학과 공학석사  
 1990년 2월 : 한국과학 기술원 전기 및 전자공학과 공학박사

1994년 8월 : 한국통신 통신망 연구소 선임연구원  
 1994년 9월 ~ 현재 : 영남대학교 정보통신공학과 부교수

<주관심분야> High-speed Telecommunications Networking, Network Operation and Management, NGI, TINA, Active Networking Technologies.