

전광 전달망 장애 복구 알고리즘의 성능 분석

주윤기¹ · 이종현²

¹선문대학교 벤처 및 산업공학 / ²한국전자통신연구원

Performance Evaluation of a Distributed Restoration Algorithm for All-optical Networks

Un-Gi Joo¹ · Jong-Hyun Lee²

This paper considers a network restoration algorithm for all-optical WDM networks. As the increasing traffic and transmission speed, any failure on the networks will lead to loss of huge data and disruption of the services. Therefore, a network restoration algorithm is necessary for the high-speed all-optical networks. This paper suggests a distributed restoration algorithm for line or channel level failures under the dynamic rerouting. For the algorithm, some measures for performance evaluation are explicitly derived and simulation studies are exploited to evaluate its usability by SLAM(Simulation Language for Alternative Modeling) II.

1. 서론

증가하는 트래픽(traffic)과 다양한 서비스에 대처하기 위해 현재 세계적으로 활발한 연구를 수행하고 있는 분야 중 하나가 전광 전달망(all-optical transport network)에 관한 것이다(Alexander *et al.*, 1993; Brackett *et al.*, 1993; Hill *et al.*, 1993). 전광 전달망은 광/전 변환 과정을 거치지 않고 모든 신호를 광으로 처리하는 망으로, 대량의 트래픽을 고속으로 전송할 수 있는 광 섬유 망이다. 그러나 망 노드 장치들간 단일 광섬유에 의해 전달되는 정보의 양이 방대해지고, 망 구성이 복잡해짐에 따라 망 내에서 발생하는 장애는 짧은 시간에 대량의 정보 손실을 유발할 뿐 아니라 상호 연결된 다른 노드로 장애 현상을 파급하는 원인이 될 수 있다. 또한 이와 같은 망 장애에 의한 서비스 단절 현상은 전송 서비스 이용자에게 정보 손실을 유발시켜 심각한 경제적 손실을 초래하게 된다. 따라서, 광 전달망 장애 복구 알고리즘은 이러한 망 장애에 대한 서비스 단절 현상을 방지하기 위한 필수 조건 중 하나이다.

장애복구 방식에 대한 연구로, TDM을 활용하는 DXC(digital Cross-connect)로 구성된 망에서의 장애 복구 방식에 대한 연구(Coan *et al.*, 1991; Kobriniski and Azuma, 1993; Wu and Kobriniski, 1994; Hasegawa *et al.*, 1994; TTM1.3/94-1-1, 1994)는 많이 이루어졌으나, 이러한 장애 복구 알고리즘을 전광 전달망에서의 장애 복구를 위해 이용한다면 복구 속도가 느리고 복구를 수행

할 수 있는 장애의 유형도 제한적이므로, 전광 전달망을 위한 장애복구 알고리즘이 필요하다(Gerstel and Ramaswami, 2000). WDM 방식의 OXC(Optical Cross-connect) 망에서의 망 복구 알고리즘에 대한 연구로는, 일본의 NTT를 중심으로 한 OXC 장애 복구 알고리즘에 대한 연구(Sato *et al.*, 1994; Nagatsu *et al.*, 1996a; Nagatsu *et al.*, 1996b)가 있다. 여기서 Sato *et al.*(1994)은 중앙제어를 통해 장애복구를 위한 경로를 찾는 경우에 광 경로(optical path)를 이용한 방법이 PDH, SDH 또는 ATM 방식을 이용하는 것보다 성해진 시간 내에 더 많은 경로를 찾을 수 있음을 시뮬레이션을 통해 보였다. 그리고 Nagatsu *et al.*(1996a, 1996b)는 망 장애 발생 이전에 미리 정한 복구 경로를 따라서 복구가 이루어지는 선 경로설정(pre-determined) 경우에 대한 광 경로 설정 방안을 제안하였다. Ramaswami and Segall (1997)의 연구에서는 주어진 망에 대한 동적인 연결 및 단절 방법 및 이를 위한 스위치 관리 모듈과 제어 모듈 메시지 교환 방법을 다루었다. 그러나 이들 연구는 광 전달망 장애복구를 위한 전체적인 알고리즘(절차)를 다룬 것이 아니라 복구 경로 설정 또는 탐색과 같은 일부의 기능에 대한 연구들이다.

본 논문에서는 WDM 방식의 OXC을 망 노드 장치로 사용하고 있는 임의 구조의 통신망에서의 여러 광 링크 장애(cut) 및 채널장애에 대처할 수 있게 분산 제어하에서 동적(dynamic)으로 결정한 우회 경로를 이용하여 선로(line) 복구를 수행할 수 있는 알고리즘을 제안한다. 전광 전달망에서의 선로 복구를 위한 알고리즘을 구체적으로 다룬 연구로는 Ramamurthy and

Mukherjee(1999)와 Fujii *et al.*(1999)가 있다. Ramamurthy and Mukherjee(1999)는 복구를 위한 메시지를 모는 링크를 통해 방송(broadcasting)하면서 경로 설정과 여유 채널(과장) 확보를 동시에 처리하는 2단계의 절차를 통해 복구를 수행하는 방안을 제시하였는데, 이는 하나의 링크 장애에 대해 필요이상으로 많은 채널을 확보하게 되므로 여유 채널의 활용도가 낮고 여러 개의 링크에서 동시에 장애가 발생하는 경우에는 복구율이 낮은 단점이 있다. 그리고 여기에서는 장애가 발생한 채널 별로 복구를 시도하는 구조를 가지고 있으므로, 장애 복구에 소요되는 시간이 크다는 단점이 있다. Fujii *et al.*(1999)은 본 논문에서 제시하는 알고리즘과 마찬가지로 경로탐색, 여유 채널 확보 및 새로운 구성 설정의 3단계를 통해 장애 복구를 하는 방안을 제시하였다. 그러나 Fujii *et al.*의 복구 경로 탐색 과정은 단지 장애 사실을 복구를 주도하는 상대방 노드장치(chooser)에게 알려주는 기능만 하는 방식이어서 복구 경로 정보를 관리하지 않으므로 경로 상 반복(loop)을 방지할 수 있는 방법이 없고, Chooser에 도착한 경로 탐색 메시지의 정보에서 구한 여유 채널을 확보할 수 있다는 보장을 하지 못하는 단점이 있다. 이를 위해, Fujii *et al.*은 여유 채널 확보 과정에서 나무(tree) 구조의 다중경로를 허용하고 있지만, 여유 채널을 확보한 경로에 대한 정보에서도 경로를 노드 ID(IDentity)만으로 관리하므로 인접 노드 간에 여러 개의 링크가 존재하는 경우에는 이 알고리즘을 적용하기 어렵다. 더구나, 여기에서는 복구 과정(return-to-normal)에 대한 고려도 하지 않았다. 본 논문에서는 장애 복구 경로 탐색 과정에서 반복(loop)을 방지하고, 복구 경로 탐색 과정에서 구한 복구 경로를 여유 채널 확보를 위해 활용하는 형태를 취함으로써 효율적인 채널 확보를 할 수 있게 하였고 복구 과정도 고려하였다. 그리고 본 논문에서 제안하는 복구 알고리즘의 성능 분석을 위해 여러가지 성능척도를 명시적으로 정의하였고 SLAM(Simulation Language for Alternative Modeling) II(Prijsker, 1994)를 이용한 시뮬레이션을 수행한다. 기존의 장애 복구 알고리즘에 대한 성능 평가 연구의 대부분은 시뮬레이션 분석에 한정되어 있고 성능 평가 척도에 대한 명시적인 정의도 부족한 상태이다. 선로복구에 대한 성능척도에 대한 연구로, Limal *et al.*(1998)은 본 논문에서 정의한 생존율(survivability ratio) 척도를 용량 이용도(capacity utilization)라는 용어를 사용하여 정의하고 용량 이용도의 상한값을 유도하였다. 그러나 이 상한값은 광 전달망 내의 임의의 두 인접 노드장치 간에 설치된 링크는 하나이고 각 링크 당 채널 수가 모두 같은 경우를 가정하고 있다. Ramamurthy and Mukherjee(1999)는 본 논문에서 정의한 것과 같은 복구 시간(restoration time)을 정의하여 유도하였는데, 복구 시간 유도를 위해서 복구에 필요한 모든 처리시간 및 경로를 구성하는 노드의 수가 정확히 알려진 값이라는 가정을 하였다. 본 논문에서는 복구를 위한 각 단계의 처리에 소요되는 시간 및 경로 길이가 임의 분포를 따른다고 할 때, 평균 복구 시간, 복구율(restoration ratio), 생존율 및 여유 채널 활용도를 명시적으로 정의하였다. 본 연구에서 제시

하는 명시적인 성능 척도는 복구 알고리즘의 상대적인 성능 비교 분석을 위해 사용할 수 있는 유용한 결과로 판단된다. 그리고 시뮬레이션 분석을 통해서 본 논문에서 제안하는 장애 복구 알고리즘이 전광 전달망의 자동적인 장애 복구를 위해 실용 가능성을 보이고 장애 복구를 위해 중요하게 고려해야 할 요소들을 분석하였다.

2. 장애 복구 방식

광 전달망의 장애 복구를 위해서는 광 신호를 감시하고 장애가 발생하였음을 인식할 수 있는 기능 모듈, 장애가 발생한 채널에 대한 우회 경로를 찾아서 새로운 경로를 설정해 주는 역할을 하는 기능 모듈, 장애 복구 관련 메시지의 송신 및 수신을 담당하는 기능 모듈(장애 복구 모듈), 모든 구성 설정 정보를 관리하는 기능 모듈 그리고 망 관련 정보나 망 운영 정보를 관리하는 GUI(Graphic User Interface) 등이 필요하다. 본 논문은 이중 장애 복구 모듈에 필요한 복구 알고리즘을 개발하는 것이 주요 목적이다.

망 장애는 단위 채널 장애, 링크 장애 및 노드 장애의 형태로 발생된다. 이를 위한 장애복구 방식(Wu, 1992; TIM1.3/94-101, 1994)은 짧은 복구 시간, 높은 복구율, 적은 여유 채널 양 그리고 넓은 적용 범위 및 적은 메시지 양을 이용하는 것이 일반적으로 요구되지만, 이들 조건들 중에는 서로 상충되는 것도 있기 때문에 이들 모두를 만족시키기는 어렵다. 따라서, 여러가지 다양한 유형의 복구 알고리즘이 존재할 수 있는데, 본 논문에서는 분산 제어하에서의 동적(dynamic)으로 결정된 우회 경로를 이용한 선로(line)복구 방식을 고려한다. 이는 이러한 유형의 복구 방식이 일반적으로 빠른 복구를 할 수 있기 때문에 택하였지만(Wu, 1992), 분산제어 형태는 인접 노드 장치간 메시지의 송수신을 통해 복구를 수행하므로 알고리즘이 복잡해지고 관련 메시지 구조(format)도 중요한 역할을 한다.

분산제어를 통한 메시지 교환을 위한 관련 메시지 송수신은 링크 단위의 제어 채널(supervisory control channel)을 이용하는 것으로 가정하는 데(Tada, 1996), 인접 노드 장치간 메시지 교환은 이 제어채널을 통해 flooding (routing) 알고리즘을 이용하여 장애 복구를 수행하는 형태로 구성한다. 여기서 각 노드 장치간에 송신용과 수신용 링크가 별도로 존재하고, 송수신 중 어느 한 방향으로의 문제가 발생한다 해도 이를 복구하는 것으로 한다. WDM 망에서는 한정된 수의 파장을 광 전달망에 할당하여 서비스를 수행하므로 파장 할당 방법이나 각 장치별 파장 변환 정도에 따라 망의 성능에 차이가 발생한다. 본 연구에서는 주어진 망에 적합하게 파장이 할당되어있고 각 노드 장치가 모든 파장간 파장 변환이 가능한 상황을 고려한다. 그러나 본 연구에서 제안하는 장애 복구 알고리즘은 메시지 구조 중 여유 채널 상태 정보에 파장 변환 가능 여부에 대한 상황 정보를 반영할 수 있게 메시지 구조를 설정해서 파장 변환이

제한적인 노드장치가 존재하는 경우에도 큰 변경 없이 사용 가능하도록 알고리즘을 구성하였다.

2.1 전체 흐름도

망 장애 복구 알고리즘의 수행을 위해서는 초기에 망 구조 정보 및 초기 여유 채널 정보를 알아야 한다. 본 논문에서는 분산 제어 구조를 적용하므로 각 노드장치(OXC) 별로 자신이 인접한 망 노드 및 링크에 관한 정보와 채널 정보 및 장애복구 알고리즘을 제어하기 위한 변수값을 입력 받아서 복구를 위해 이용한다.

복구를 해야 할 망의 링크 및 채널의 장애가 발생하면, 복구를 주도할 두개의 노드(Sender와 Chooser) 장치를 결정하여 장애 복구를 시작한다. Sender는 장애가 발생한 채널에 대한 우회 경로를 찾는 정보(Help 메시지)와 새로운 복구 스위칭(switching) 설정 정보(COF: confirmation 메시지)를 형성하여 Chooser를 향해 송신하고, Chooser는 찾아진 우회 경로에 대한 사용권 예약을 위한 정보(ACK: acknowledgement 메시지)를 형성하여 Sender 노드쪽으로 보내는 역할을 한다. 복구에 관여하는 노드장치 중 Sender와 Chooser가 아닌 중간 노드장치들은 수신 링크를 통해 받은 망 복구 관련 정보를 처리하여 복구 경로 상의 인접 노드 장치를 향해 송신하는 역할을 한다. 이와 같이 복구를 위한 경로 상의 각 노드장치는 자기 자신의 인접 노드장치로부터 수신한 정보의 종류에 따라 분산적으로 처리하여 빠른 복구를 할 수 있도록 한다. 그리고 장애의 수리시에는 Chooser에서 복구 메시지를 형성하여 Sender쪽으로 보내는데, 이때 각 메시지의 대표적인 종단점은 <그림 1>과 같이 각각 Chooser와 Sender 노드가 된다.

2.2 제안하는 장애 복구 방식의 절차

Help메시지와 ACK메시지는 각각 우회 경로 탐색과 우회 경

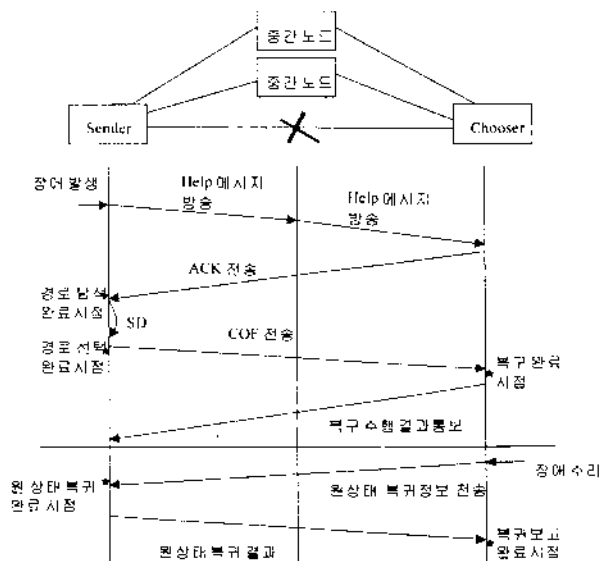


그림 1. 전체 흐름도.

```

struct NewCM_Tx
{
    unsigned short Type;
    unsigned short S_NID; unsigned short C_NID;
    unsigned short LID;
    unsigned char RC;
    struct HelpPaths HelpPath[12];
    unsigned char AB; unsigned char SAB;
    struct NewCM_Form Conf[12];
};

struct HelpPath
{
    unsigned short IB_NID; unsigned short IB_LID;
};

struct NewCM_Form
{
    unsigned char DXC_Type; unsigned char SOURCE_Channel;
    unsigned char INPUT_Channel; unsigned char OUTPUT_Channel;
};
    
```

그림 2. 새로운 구성 설정 메시지 구조.

로 선택(확보)의 유사한 기능을 처리 위해 주로 이용하므로, 동일한 구조의 메시지를 사용하고 메시지의 유형(Type)으로 각 메시지를 구분하는 형태를 취한다. 그러나 COF 메시지는 선택한 경로를 따라서 확보된 채널만큼 장애 채널에 대한 재구성 설정을 위한 것이므로 Help 메시지나 ACK 메시지에 포함된 정보 외에 재구성 설정 정보도 필요하므로 크기가 큰데, 이 장에서는 <그림 2>의 COF 메시지를 주로 이용하여 장애 복구 절차를 기술하였다.

장애 복구를 위한 순서는 다음과 같다.

- (1) 초기화 : 각 노드장치 별 자신의 인접 망 노드 정보와 연결 링크 정보 등을 GUI 장치를 통해 수신한다. 이 과정에서 인접한 각 링크별 여유 채널 정보(State[i])도 입력 받아야 하는데, 각 채널 별 파장 변환 가능 여부 및 변환 가능 파장 목록 등을 포함한 정보가 필요하다. 이를 통해 각 노드, 링크 및 채널의 ID(identity)를 설정한다.
- (2) 제어 메시지 전송 : 장애가 검출되어 망 장애 복구 알고리즘이 필요한 경우, 장애가 발생한 링크 ID(LID) 및 채널 ID들을 망 장애 복구 알고리즘에 통보하여 장애 복구를 시작한다. 먼저, 장애가 발생한 링크(LID)에 인접한 두 노드 중 노드 ID가 작은 것을 Sender(S_NID)로 하고 큰 것을 Chooser(C_NID)로 정한다 다음 Sender에서부터 다른 망 노드 장치로 Help메시지를 전송한다. 여기서 노드 ID의 내소 비교를 위해서는 초기화 과정에서 입력 받은 망 구성 정보를 이용한다. Help 메시지에는 <그림 2>와 같이 메시지 유형을 구분해주기 위한 변수인 Type, 각 장애를 구분하기 위한 식별자(S_NID, C_NID, LID), 복구를 위한 우회 경로의 길이(hop count)를 관리하기 위한 변수인 RC 및 AC, 효율적인 경로 탐색을 위한 경로 정보인 HelpPaths, 복구 가능한 채널의 개수를 관리하기 위한 변수인 AB, SAB 그리고 여유 채널별 상태(사용상태/사용가능상태/확보상태) 정보를 나타내는 State[32]를 포함하여 구성한다. Sender에서는 Type=0으로 하여 Help 메시지임을 확인할

수 있도록 하고, 장애가 발생한 링크에 관련된 식별자 (S_NID, C_NID, LID) 값 및 복구를 해야하는 채널의 수를 AB값으로 기록하고, GUI 장치를 통해 입력받은 우회 경로길이의 상한값인 RC 값을 기록한 후, AC=1로 하고 HelpPaths 에는 송신할 링크 ID(IB_LID)와 Help 메시지를 수신할 노드ID (IB_NID)를 기록하여 인접 노드장치 IB_NID로 IB_LID를 따라 송신한다. 이때, Help메시지는 자신의 노드에 인접한 모든 링크에 각각의 (IB_LID, IB_NID)를 첨부한 후 링크 IB_LID를 통해 복구할 수 있는 여유 채널 수를 SAB로 두어 송신한다. Type=0인 메시지를 망 내의 임의의 노드 장치에서 수신하면, 자신이 Chooser(C_NID)인지를 확인한 후, Chooser이라면 '(3) 루팅' 단계를 수행한다. 그렇지 않다면, Help메시지 방송 중지 조건을 만족하는 지를 검토한다. 수신한 Help메시지의 내에서 $AC+1 > RC$ 이거나 $HelpPath[i].IB_NID = \text{'인접노드 ID'}$ 또는 $SAB=0$ 이라면 이러한 조건이 해당되는 인접 링크로는 Help메시지를 송신하지 않는다. 이러한 Help 메시지 방송 중지 조건을 만족하지 않으면, $AC = AC + 1$, $SAB = \text{Min}\{\text{수신한 메시지에서의 SAB값, 송신할 링크의 여유 채널 개수}\}$ 으로 한 후, HelpPaths에 (IB_LID IB_NID)를 덧붙여서 송신한다.

(3) 루팅(routing selection) : Type=0인 Help메시지가 Chooser에 도착하면 HelpPaths 정보에 담겨있는 우회 경로를 이용하여 SAB개의 채널을 복구할 수 있음을 알게 되고, 이 경로를 따라서 $SAB = \text{Min}\{SAB, AB\}$ 개의 채널을 복구할 위해 확보하기 위한 ACK정보를 Sender를 향해 전송한다. SAB개의 채널 확보를 위해서는 HelpPaths[AC].IB_LID의 채널 중 '사용가능 상태'인 SAB개의 채널을 '확보상태'로 상태를 변경시킨다. 그리고 ACK메시지임을 표시하기 위해서는 Chooser가 수신한 Help메시지에서 Type=1로 하여 HelpPaths[AC].IB_LID를 향해서 송신한다. Type=2인 메시지를 수신한 임의의 노드장치는 ACK정보를 송신한 링크의 채널 상태를 수신한 ACK메시지의 State[i]와 같도록 하여 SAB개의 채널을 확보하는 데, 이 과정은 각 노드 장치가 자신에게 인접한 망 정보만을 가지고 복구를 수행하는 분산제어 방식을 따르는 구조를 가지고 있으므로 필요하다. 즉, LID=2인 링크가 노드 ID 10과 20을 연결하는 우회경로 상의 링크이고 SAB=3이라고 할 때, 노드 ID 10에서 링크 ID 2의 파장 ID 2, 3, 4번을 복구 채널로 확보한 후 ACK메시지를 복구 경로 상의 다음 노드장치인 노드 ID 20에 송신하였다면, 노드 ID 20에서도 링크 ID 2번의 파장 ID 2, 3, 4번을 장애 복구를 위한 채널로 확보해두어야 한다. 다음으로, 자신의 노드 ID가 Sender(S_NID)인지를 확인하여, 자신이 Sender이면 '(4) 재루팅' 과정을 수행한다. 그렇지 않으면, SAB개의 여유 채널을 확보한 후, $AC = AC - 1$ 로 하여 HelpPaths[AC].IB_LID를 통해 ACK 메시지를 송신한다. <그림 1>에는 묘사되어있지 않

만, ACK메시지 송신 과정에서 링크 HelpPaths[AC].IB_LID의 '사용가능 상태'채널 수가 ACK 메시지의 SAB개 이하이면, SAB값을 그 링크의 '사용가능 상태' 채널 수로 수정 기록한 후, SAB개의 채널을 확보하는 처리 후 HelpPaths [AC].IB_LID에 전송하고, HelpPaths[AC+1].IB_LID로는 SAB 값을 HelpPaths[AC].IB_LID에서 부족한 채널 수로 기록한 후 Type=5로 한 메시지를 전송하여 확보된 SAB개의 여유 채널을 '사용가능' 상태로 되돌리는 기능을 수행한다.

(4) 재루팅(rcrouting) : Sender에 ACK 정보가 도착되면, 확보된 여유 채널을 이용해서 장애 채널에 대한 재구성을 설정해가며 Chooser를 향해서 <그림 2>의 COF 메시지를 전송한다. 여기서 SD(Search Duration)개의 ACK 정보 또는 SD시간 동안 Sender에 대기한 후, 제일 큰 SAB값을 갖는 경로를 복구를 위해 우선적으로 이용한다. 여기서 SD는 한번에 가능한 한 많은 채널을 복구할 수 있는 경로를 선택하기 위한 상수값으로 망 운영자가 외부에서 설정할 수 있도록 하였고, 복구를 수행한 채널 수는 Sender에서 (S_NID, C_NID, AB)값을 메모리에 저장하여 관리한다. 새로운 구성 설정을 위해서 Sender에서는 장애가 발생한 채널(SOURCE_Channel)을 INPUT_Channel로 하고 OUTPUT_Channel은 HelpPaths[1].IB_LID의 채널 중 '확보 상태'의 채널을 SAB개 순서적으로 선택(first-fit wavelength selection) 하여 DXC_Type을 스위칭 '설정' 형태로 하여 새로운 구성(INPUT_Channel, OUTPUT_Channel)을 설정하고, 이 설정 정보를 메모리에 저장한다. 그 다음 $AC = AC + 1$, $Type=3$ 으로 하여 HelpPaths[AC-1].IB_LID를 통해 COF를 송신한다. 임의의 노드장치가 Type=3인 메시지를 수신하면, 자신이 Chooser인지를 확인한다. 만약, 수신한 메시지에 대한 Chooser가 자신이 아니면, COF의 OUTPUT_Channel을 INPUT_Channel로 두고 대신 HelpPaths[AC].IB_LID링크에서 확보한 채널 SAB개를 순서적으로 OUTPUT_Channel값으로 설정하여 재구성 설정을 한 다음, $AC=AC+1$ 로 두고 HelpPaths[AC-1].IB_LID를 통해서 COF메시지를 송신한다. 그러나 만약 자신이 Chooser라면, 수신한 COF 메시지의 OUTPUT_Channel을 SOURCE_Channel로 연결하는 재구성 설정을 한 후, 이 COF 정보를 메모리에 저장하고 관리한다.

(5) 정상 상태 복귀(return-to-normal) : 장애의 원인이 소멸되었을 때, 원래 상태의 파장 할당형태로 복귀한다. 이를 위해서는 수리가 된 장애 링크 정보인 (S_NID, C_NID, LID)를 통보받은 Chooser에서 Sender를 향해서 HelpPaths의 경로를 따라서 <그림 2>의 COF 메시지의 DXC_Type를 '스위칭 해제'로 설정하여 수행한다. 따라서, 이 과정의 수행을 위해서는 재설정이 수행된 채널 정보를 복구 경로 상의 각 노드가 그 채널들의 복귀가 완료되기 전까지는 자체 메모리(memory)에 기억해두어야 한다.

앞에서 기술한 5가지 주요 절차 외에, 복구를 위한 메시지의 전송중에는 링크나 전송 노드의 상태에 따라서 발생할 수 있는 일시적인 전송 장애나 오류에 대처해야 한다. 예를 들면, 복구 경로 상의 한 노드장치에서 다음 노드 장치를 향해 ACK나 COF메시지를 송신하였는데, 일시적인 전송오류가 발생하여 메시지가 도달되지 않을 경우가 있다. 이러한 경우를 위해서는 수신측에 시간측정기(timer)나 계수기(counter)를 설치하여 미리 정한 특정 시간 내에 메시지가 도착되지 않으면 전송 오류로 인식하여 재전송을 요구하는 메시지를 송신한다. 또한 재구성 설정시에도, 하드웨어적인 문제나 다른 추가적인 문제로 인해 실제 스위칭을 수행 못하는 경우도 일부 재구성 설정이 완료된 부분을 해제 시킨다. 그리고 광 전달망 내에는 파장 변환 기능이 제한적이거나 또는 파장 변환을 전혀 할 수 없는 노드 장치도 있을 수 있는데, 이 경우에는 Help 메시지의 AB값을 1로 두어 장애 파장 별로 복구를 하면 된다.

3. 성능 분석

본 논문에서 제안하는 장애 복구 알고리즘의 성능 분석을 위한 척도(measure)로 고려한 것은 평균 복구 시간(restoration time), 복구율(restoration ratio), 생존율(survivable ratio), 여유 채널 활용도 및 소요 여유 채널 양이다. 이 장에서는 이들 각 척도에 대한 명시적인 정의를 한 후, 컴퓨터 시뮬레이션을 수행한다.

3.1 성능 분석 척도

성능 척도의 첫번째로 복구 시간은 복구된 채널들의 평균 복구 시간으로 측정한다. 여기서 복구된 채널들만 분석 대상으로 삼은 이유는 장애 채널 중 하나의 채널이라도 복구가 불가능할 가능성이 조금이라도 존재한다면 복구가 안된 채널까지 포함한 평균 복구 시간은 무한대의 값을 가질 것이기 때문이다. 성능 분석 척도를 위해서 복구 경로 별로 다음의 기호를 정의하자.

- N : 복구 경로 상의 총노드 수를 나타내는 확률 변수
- δ : 망 장애 복구를 시작하기 위한 준비시간
- P_i : 복구 경로 상의 노드 i 에서의 메시지 처리시간(CPU time)
- Z_i : 복구 경로 상의 노드 i 에서 복구되는 채널 수
- T_i : 복구 경로 상의 노드 i 에서의 메시지 전송시간
- S_j : 복구 경로 상의 각 노드에서 j 번째 채널의 스위칭 시간
- $E(R_j)$: j 번째 채널의 복구 시간 R_j 의 평균
- R : 복구된 모든 채널 들에 대한 평균 복구 시간

각 채널의 복구를 위해서는 <그림 1>과 같이 Sender에서 Chooser을 향해 재설정 메시지(COF)를 전송해 가면서 스위칭을 하는 데, 본 논문에서 고려하는 복구 방식은 선로복구 방식이

므로 재구성 설정 메시지가 Chooser에 이르기 전까지는 그 메시지 내에 포함되어 있는 복구 가능한 모든 채널에 대한 재설정 완료 후야야 우회 경로 상의 다음 노드로 재설정 메시지를 전송해 가다가 Chooser 노드에서는 각 채널별 재구성 설정 완료시점이 그 채널의 복구 완료 시점이 된다. 여기서 복구를 위한 모든 메시지는 항상 복구 경로 상의 원하는 인접 노드로 100% 전송된다고 가정하면, 평균 복구 시간 R 을 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$R = \frac{E\left(\sum_{j=1}^Z R_j\right)}{E(Z_N)} \quad (1)$$

여기서 분자는 복구 경로 상의 마지막 노드인 Chooser 노드에서 모든 복구 채널의 복구 시간 합에 대한 기대값을 나타내고, 분모는 Chooser 노드에서의 평균 복구 채널 수이다. 식 (1)에서와 같이 평균 복구 시간을 측정하기 위해서는 각 채널별 복구 시간을 알아야 하는데, $E(R_j)$ 은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$E(R_j) = E\left[\delta + \left(\sum_{i=1}^N P_i + \sum_{i=1}^{N-1} T_i\right) + \left(\sum_{i=1}^N P_i + \sum_{i=2}^N T_i\right) + \left(\sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=1}^Z S_j + \sum_{i=1}^{N-1} T_i\right) + \sum_{k=1}^j S_k\right] \quad (2)$$

여기서 복구 경로 상의 첫번째 노드는 Sender를 의미하고 마지막 노드인 N 번째 노드는 Chooser를 의미한다. δ 는 망 장애 복구 알고리즘을 구동시키는 조건이 충족되기까지의 시간으로, 일반적으로 장애 발생임을 선언하는 데 소요되는 시간과 다른 복구 알고리즘을 수행하는 데 걸리는 시간을 합한 것이다. 두번째 항은 우회 경로를 탐색하기 위해 Sender에서 Chooser로 Help메시지가 도달하는 데 필요한 시간을 나타낸다. 여기서 각 노드에서의 메시지 처리시간 및 전송시간에는 전송 오류에 따른 재전송을 위한 시간도 포함된 것으로 가정한다. 마찬가지로 세번째 항은 Chooser에서 전송한 ACK 메시지가 Sender에 도달하기까지 걸리는 시간을 표시하고, 나머지 항들은 Sender에서 Chooser를 향해 새로운 구성 설정 메시지가 전송됨에 따른 소요 시간을 나타내는데, 이들은 상황에 따라 다른 N 개의 노드를 갖는 경로를 따라 처리된다.

분석의 편리를 위해 Sender와 Chooser간 각 메시지 별 처리시간은 각 노드나 링크에 따라 동일한(identical) 확률분포를 따르면서 서로 독립(stochastically independent)이라는 가정을 하자. 즉, 경로 탐색 및 여유 채널 할당을 위해 경로에 대한 처리를 필요로 하지만 이들 처리에 소요되는 부하(load)는 서로 영향을 미치지 않고 복구 경로 상의 노드 수 N 이 $\{P_i\}$, $\{T_i\}$ 및 $\{S_j\}$ 와 독립이라고 가정하면, $E(R_j)$ 는 다음과 같이 정리된다(Ross, 1983).

$$E(R_j) = \delta + [E(N)E(P) + E(N-1)E(T)] + [E(N)E(P) + E(N)E(T)] + E\left(\sum_{j=1}^{N-1} Z_j\right)E(S)$$

$$\begin{aligned}
 &+ E(N-1)E(T) + jE(S) \\
 = &\delta + E(N)[2E(P) + 3E(T)] - 2E(T) \\
 &+ E\left(\sum_{i=1}^{N-1} Z_i\right)E(S) + jE(S) \quad (3)
 \end{aligned}$$

여기서, $\{Z_i\}$ 는 비증가(nonincreasing)하므로 서로 확률적으로 독립이라고 하기는 어렵다. 그러나 만약 주어진 광 전달망의 모든 링크가 임의의 망 장애에 대처할 수 있을 정도의 충분히 많은 여유 채널을 가지고 있다면, $E(Z_i) = E(Z_N)$, $i = 1, 2, \dots, N-1$ 이 되고, R_j 와 Z_N 및 N 이 서로 독립이라면 임의의 링크 장애에 대한 평균 복구 시간은 다음과 같게 된다.

$$\begin{aligned}
 R = \frac{E\left(\sum_{j=1}^{Z_N} R_j\right)}{E(Z_N)} = &\delta + E(N)[2E(P) + 3E(T)] \\
 &- 2E(T) + E(S)E(Z_N)\left[E(N-1) + \frac{1}{2}\right] + \frac{E(S)}{2} \quad (4)
 \end{aligned}$$

위와 같이 평균 복구 시간은 복구 경로의 길이, 메시지 처리 시간, 복구되는 채널 수, 메시지 전송 시간 및 스위칭 시간 등의 확률함수(probability function)나 평균(mean) 값을 필요로 한다.

식 (1)에서 평균 복구 시간인 R 은 복구된 채널들에 대한 것으로, 복구가 되지 않은 채널에 대한 것을 배제하였다. 복구율은 이러한 비복구 채널 비율을 측정하기 위한 것으로, 총 장애 채널 수에 대한 총 복구 채널 비율로 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\text{복구율} = \frac{E(Z_N)}{E(F)} \quad (5)$$

여기서 F 는 임의의 링크를 흐르고 있는 운용 채널 수를 나타낸다. 따라서, 만약 선택한 우회 경로를 이용해 모든 장애 채널을 복구할 수 있을 만큼 충분히 많은 여유 채널이 있다면, $E(F) = E(Z_N)$ 가 되어 복구율은 1(100%)이 된다.

생존율(survivability ratio)은 운용 채널 중 어느 정도의 채널이 평균적으로 서비스를 지속할 수 있을 것인지에 대한 성능 척도로, 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\text{생존율} = 1 - \frac{E(F) - E(Z_N)}{D} \quad (6)$$

여기서 D 는 전달망의 전체 트래픽을 나타낸다. 복구율과 마찬가지로, 모든 링크의 여유 채널이 충분히 많은 우회 경로가 존재한다면 생존율이 1에 가까워질 것이다.

마지막으로, 복구를 위해 이용하는 여유 채널 양을 측정하기 위한 척도로서, 여유 채널 활용도는 총 운용 채널 수에 대한 복구를 위해 이용한 채널 수로 정의할 수 있는데, 복구를 위해 이용하는 채널 수는 (복구 링크의 길이) × (링크 당 복구를 위해 이용된 여유 채널 수)이므로, 복구를 위해 이용된 경로의 길이가 길면 사용하는 여유 채널의 수가 많아지므로 여유 채널 비율이 커진다.

$$\text{여유 채널 활용도} = \frac{E(N) \times E(Z_N)}{D} \quad (7)$$

여기서 정의한 식 (1)-(7)의 성능 척도들은 유도를 위해 복구 경로 상의 노드 수와 복구에 필요한 기간 간에 확률적으로 독립이라는 가정을 사용했는데도 불구하고, 링크의 여유 채널 수가 한정적인 경우에는 $E(Z_N)$ 을 구하기가 어렵다. 그러나 Limal *et al.*(1998)이 유도한 생존율의 상한값 수식을 이용하기 위한 전제조건이 필요 없고, 복구 시간의 경우에도 Mukherjee (1999)가 제시한 수식에서 요구하는 가정이 필요 없으므로, 임의의 망 구조 및 파장 할당에 대해 적용할 수 있는 장점이 있다. 다음 장에서는 실제 상황의 분석이 가능한 시뮬레이션 분석을 수행한다.

3.2 시뮬레이션 성능 분석

제한한 망 복구 알고리즘의 사용 가능성을 검토하고 성능 분석을 위해 범용의 시뮬레이션 언어 중 하나인 SLAM II를 이용하였다. 시뮬레이션을 위한 대상으로 선정된 망 유형은 <그림 3>과 같은데, 이는 한국의 전형적인 백본 망(backbone network)의 하나로, 링크는 양 방향 통신이 가능하도록 설치된 상태를 고려하고, 링크 상의 수치는 인접 지역간 통신을 위해 배정된 2.5 Gbps 회선의 수(강철신, 1997)를 나타낸다. 여기서 점선 외의 망을 '적용 망 I', 점선을 포함한 망을 '적용 망 II'라고 하기로 하고, 링크 장애는 '적용 망 I'의 링크에서만 발생하는 것으로 가정하는 데, 이러한 가정은 다음의 분석 결과에 큰 영향이 없을 것으로 판단된다.

다음은 시뮬레이션을 수행하기 위해 고려한 사항들이다.

- 링크별 채널 수는 4, 8, 16 또는 32 채널
- 각 노드에서 장애 감지에 소요되는 시간은 60 msec
- 노드에서의 메시지 처리 시간은 1~9 msec의 일양(uniform) 분포를 따름
- 메시지 전송시간은 평균 4.4 msec의 지수(exponential) 분포를 따름
- 스위칭 시간은 채널당 평균 10 msec (Wu, 1994)의 지수분포를 따름
- hop count limit = 5

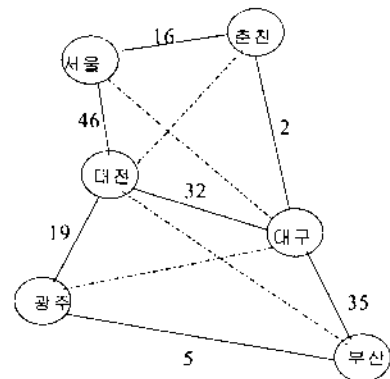


그림 3. 적용 대상망.

표 1. 국내 주요 도시간 트래픽

| 링크별 파장 수(a) | 4 | 8 | 16 | 32 | |
|-------------|-------|----|----|----|-----|
| 링크별 트래픽(b) | 서울-춘천 | 4 | 8 | 16 | 16 |
| | 서울-대전 | 4 | 8 | 16 | 32 |
| | 춘천-대구 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| | 대전-대구 | 4 | 8 | 16 | 32 |
| | 대전-광주 | 4 | 8 | 16 | 19 |
| | 대구-부산 | 4 | 8 | 16 | 32 |
| | 광주-부산 | 4 | 5 | 5 | 5 |
| | 합계(d) | 26 | 47 | 87 | 138 |

(b) = min {a, 링크별 트래픽 수요}

링크별 채널 수는 현재의 가용한 기술 수준(Green, 1996)을 고려하여 설정하였다. 장애 복구를 감지하는 데 걸리는 시간은 장애 상태를 선언하는 데 소요되는 10 msec에 APS (automatic Protection Switching)와 같은 다른 복구 방식의 시도를 위한 50msec을 합하여 총 60 msec로 설정하였다. 메시지 전송률은 복구 메시지 전송률을 192 kbps (Hasegawa *et al.*, 1994)로 하고 각 제어 메시지는 <그림 2>의 107 바이트(COF 메시지)를 기준으로 한 것으로서 $107 \times 8 / (192 \times 1024) = 0.004353841 \approx 4.4$ msec를 이용하였다

전송 경로 길이의 제한을 위해서 hop count를 5로 제한하였는데, hop count는 전송 경로 상에 있는 노드 수이므로 허용 가능한 경로 길이를 반영하여 설정 가능하다.

성능 분석을 위해 <그림 3>의 링크별 트래픽을 <표 1>과 같이 설정하였고, 여유 채널 양은 Coan *et al.*(1991)의 분석 결과에 따라 운용 채널의 약 75%가 되도록 링크별로 설정하였다. SLAM II를 이용한 분석을 위해 각 링크의 장애는 GATE 문으로, 각 링크별 여유 채널 양은 RESOURCE 문을 이용하였고, 망 내 트래픽 및 복구 경로를 모사하기 위해서는 ARRAY(I, J) 문을 이용하여 모델링을 하여 분석한 결과는 다음과 같다.

3.3 시뮬레이션 분석 결과

제안한 알고리즘이 장애를 복구한 후 복귀하는 과정을 포함하고 있지만, 여기에서의 주요 관심사항은 장애를 복구하기까지의 성능이므로 복귀 과정은 제외하였다. 이를 위해 펜티엄 II PC에서 수행한 결과는 다음과 같다.

3.3.1 단일 링크 장애

'적용망 I'에서 임의의 단일 링크 장애에 대해 링크 당 파장 수의 증가에 따른 복구 시간, 복구율 및 생존율을 평균한 결과가 각각 <그림 4>, <그림 5> 및 <그림 6>이다. 링크 당 파장 수가 증가하더라도 장애가 발생한 채널을 복구하는 데 소요되는 시간은 <그림 4>에서 보는 바와 같이 거의 변동이 없다. 이

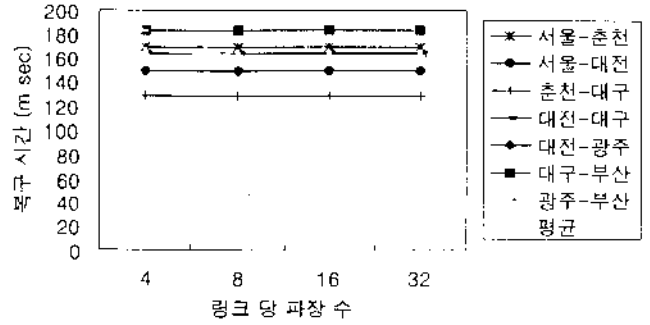


그림 4. 파장 수에 따른 복구 시간.

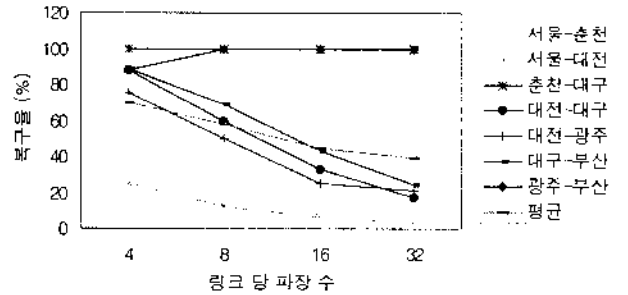


그림 5. 파장 수에 대한 복구율.

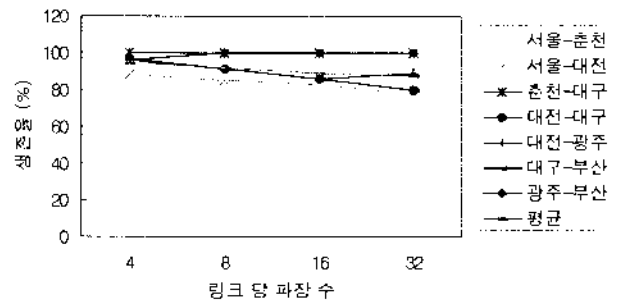


그림 6. 파장 수에 따른 생존율.

는 제안한 복구 알고리즘이 선로 복구 방식을 채택하였기 때문으로 판단되는데, 장애가 발생한 모든 채널을 가능한 한 묶어서 하나의 우회 경로를 통해 복구를 수행하기 때문이다. 그러나 '광주-부산' 간 링크 장애 경우에는 오히려 채널 수의 증가에 따라 복구 시간이 작아지는 경우도 존재하는 데, 이는 장애 복구를 위한 여유 채널의 상대적인 증가로 링크 당 파장 수가 4인 경우에 비해 더 짧은 우회 경로를 이용하여 복구를 수행해서 인 것으로 판단된다. 그러나 전반적으로 복구되는 채널에 대한 평균 복구 시간은 트래픽이 증가하더라도 거의 동일한 것으로 보인다. 제안한 복구 알고리즘의 이러한 평균 복구 시간 특성은 통신 서비스에 대한 장애시간 예측이나 관리를 용이하게 할 것이다.

트래픽이 증가함에 따라 복구율의 정도를 나타낸 <그림 5>에서는 복구율이 트래픽의 증가에 따라 감소하는 형태를 보이고 있다. 이 결과는 일정 수준의 복구율을 유지하기 위해서는 트래픽의 증가에 따라 훨씬 많은 여유 채널을 확보해야 함을

의미한다. 여기서 '춘천-대구' 간 링크의 경우에는 여유 채널에 비해 장애 채널이 적기 때문에 100% 장애 복구를 하고, '광주-부산'의 경우는 4개의 파장인 경우보다 더 나은 우회 경로를 이용할 수 있게 되어서 복구율이 향상되는 것으로 판단된다.

마지막으로 <그림 6>에서는 링크 당 파장 수 변화에 따른 생존율을 분석한 결과로, <그림 5>의 복구율보다 완만한 감소를 보인다. 이는 파장 수의 증가에 따라 총 운용 채널 중 단일 링크에 의한 장애 채널의 비율은 감소하므로 발생하는 현상으로, 단일 링크의 장애가 발생시 서비스가 계속되는 채널 비율은 증가하게 되어 발생하는 현상이다.

이러한 결과는 여유 채널을 어떻게 할당 하는가에 따라 달라질 수 있다. 따라서, 여유 채널의 영향을 분석하기 위해 여유 채널을 임의의 링크 장애에 대해 100% 복구 가능할 정도로 많은 여유 채널을 설정하여 추가로 분석했는데, 복구 시간은 여유 채널이 한정되어 있는 경우와 마찬가지로 트래픽에 대해 영향을 받지 않음을 볼 수 있었다. 그러나 100%의 복구를 위해 필요한 여유 채널 양은, <표 2>에서 보는 바와 같이 트래픽의 증가에 따라 증가하는 형태를 보였는데, 이는 여유 채널이 한정되어 있는 경우와 마찬가지로 복구율을 유지하기 위해서는 트래픽에 비해 더 많은 여유 채널 확보가 되어야 함을 의미한다. 여기서 '광주-부산'과 '춘천-대구' 간 트래픽은 파장 수의 증가에 비해 트래픽이 상대적으로 작으므로 파장 수의 증가에 따라 여유 채널 비율은 오히려 감소하는 형태를 취하고 있다. 따라서, 본 논문에서 제안하는 선로 복구 방식을 이용하면 복구 시간은 트래픽의 증가에 따라 큰 변화가 없으나, 복구율 및 생존율은 트래픽의 증가에 따라 감소한다. 그러므로 일정 수준의 복구율 및 생존율을 유지하기 위해서는 많은 여유 채널의 확보가 필요하다.

단일 링크 장애를 복구함에 있어서 망의 연결도(connectivity)가 복구 시간, 복구율, 생존율 및 여유 채널 이용 비율에 어떤 영향을 주는가를 평가하기 위해서 '적용 망 II'의 각 링크가 망 내의 총 트래픽을 복구할 수 있을 정도로 많은 여유 채널을 가지고 있는 상황에서 별도로 분석한 결과, 단일 링크 장애의 경우에는 망의 연결도가 큰 영향을 주지 않는 것으로 판단된다.

표 2. 파장 수에 따른 여유 채널 활용도 (%)

| 링크별 파장 수 | 4 | 8 | 16 | 32 |
|----------|-------|-------|-------|-------|
| 서울-춘천 | 46.15 | 51.06 | 55.17 | 34.78 |
| 서울-대전 | 46.15 | 51.06 | 55.17 | 69.57 |
| 춘천-대구 | 23.08 | 12.77 | 6.90 | 4.35 |
| 대전-대구 | 46.15 | 51.06 | 55.17 | 69.57 |
| 대전-광주 | 46.15 | 51.06 | 55.17 | 41.30 |
| 대구-부산 | 46.15 | 51.06 | 55.17 | 92.75 |
| 광주-부산 | 46.15 | 31.91 | 17.24 | 10.87 |
| 평균 | 42.86 | 42.86 | 42.86 | 46.17 |

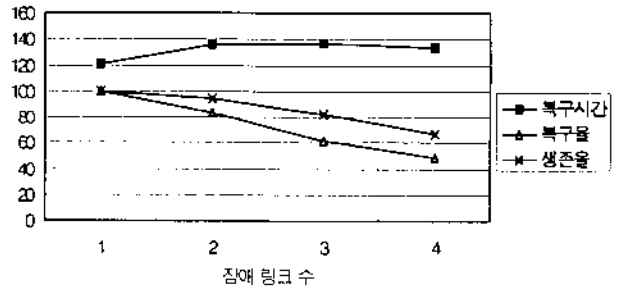


그림 7. 다중 링크 장애시 성능 분석.

3.3.2 다중 링크 장애

장애가 발생하는 링크 수에 따른 성능 분석을 위해 <그림 3>의 '적용망 II'에서 각 링크별 트래픽은 <표 1>의 링크별 파장 수가 16인 경우의 트래픽을 가지고 있고, 링크별 여유 채널은 충분히 많은(예를 들면, 망 전체 트래픽에 해당하는 87개 씩 여유 채널을 가지고 있는) 경우를 고려하였다. 모든 가능한 장애 링크 조합에 대해 각각 시뮬레이션을 수행한 결과는 <그림 7>과 같은데, <그림 7>은 동시에 장애가 발생한 링크 수가 1~4인 각 경우에 대한 장애 평균 복구 시간(msec), 평균 복구율(%) 및 평균 생존율(%)을 나타낸다.

평균 복구 시간 계산을 위해 식 (4)를 이용한다면, '적용 망 II'의 각 링크에 충분히 많은 여유 채널이 있는 경우를 고려하고 있고, 각 노드에서의 메시지 처리 시간은 1~9 msec의 일양 분포를 따르고, 메시지 전송시간은 평균 4.4 msec의 지수분포를 따르며, 스위칭 시간은 채널 당 평균 10 msec의 지수분포를 따르는 상황을 고려하고 있으므로, $E(N)=3$ 이 되고, $E(P) = \frac{1}{8}$, $E(T)=4.4$, $E(S)=10$ 이다. 따라서, 평균 복구 시간은 $R = 96.55 + 25E(Z_N)$ 가 되어 장애가 발생한 링크를 흐르고 있던 평균 채널수 $E(Z_N)$ 에 비례하여 증가하는 형태를 취한다. 그러나 <그림 7>에서 보면 동시에 장애가 발생하는 링크 수의 증가에 따라 복구 시간이 증가하다가 임의의 4개의 링크가 장애가 발생하는 경우에는 오히려 복구 시간이 감소하는 현상을 보인다. 이것은 여기서 측정된 복구 시간은 장애 복구가 완료된 채널들에 대한 평균 시간으로, 4개 링크에 동시에 장애가 발생하는 경우에는 복구 가능한 장애 비율은 감소하므로 처리해야 할 데이터의 양이 적어지게 되어 2~3개의 다중 링크 장애 경우보다 평균 복구 시간이 오히려 감소하는 것으로 판단된다. 생존율의 경우는 복구율보다는 둔감하지만 동시에 발생하는 장애 링크의 수가 증가함에 따라 감소하는 추세를 보인다. 여기에서는 여유 채널을 모든 링크에 대해서도 100% 장애가 가능하도록 많이 설정하여 두고 분석하였는데도 불구하고 단일 링크 장애에 대해서는 100% 복구를 수행하지만 동시에 장애가 발생한 링크 수가 증가함에 따라 복구율은 감소한다. 즉, 앞에서 밝힌 바와 같이 단일 링크 장애인 경우에는 망의 연결성에 큰 영향을 받지 않지만 다중 링크 장애가 발생하는 경우에는 망의 구조가 복구율에 큰 영향을 미치게 된다. 따라서, 복구율 및 생존율을 일정 수준으로 확보하기 위해서는 확보하는

여유 채널 양 및 할당 방법 외에도 적절한 망 구조 결정에 세심한 고려가 필요하다. 이러한 링크별 여유 채널 양 및 망의 연결성은 장애 복구를 위한 후회 경로 수에 직접적으로 영향을 주는 요소들이다.

4. 결론

본 논문의 목적은 WDM 방식의 OXC(Optical-Cross Connect) 장치로 구성된 임의 형태(topology)의 전달망에서 망의 장애가 발생하는 경우, 장애를 자동으로 복구하기 위한 복구 방식을 개발하여 성능분석을 하는 것으로, 분산제어를 통해서 운용중인 링크의 여유 채널을 이용하여 다이나믹하게 새로운 경로를 설정해주는 선로 복구(line restoration) 방식을 제안하였다.

바람직한 망 복구 방식은 짧은 복구 시간, 큰 복구율, 적은 여유 채널 양 그리고 넓은 적용 범위 및 적은 메시지 양을 갖는 것이라 할 수 있다. 그러나 이 모든 사항을 만족하는 복구 방식을 구축하는 것은 쉬운 일이 아니다. 본 연구에서는 복구 시간을 중요한 고려 사항으로 선택하였고 복구율도 방식 설정에 중요한 요소로 고려하여 알고리즘을 제안하였다.

본 논문에서 제안한 알고리즘의 성능 분석을 위해 각 성능적도별 명시적인 정의를 먼저 하였다. 이러한 정의를 위한 수식 표현이 비록 다른 알고리즘과의 상대적인 분석을 위한 비교 수단으로 이용될 수가 있지만, 이를 위해서 여러가지 가정 사항이 필요하게 되어 실제 상황에 대한 만족스러운 평가를 하기에는 어려움이 있다. 따라서, 실제 상황에 대한 성능 분석을 위해 SIAM II를 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 결과, 본 논문에서 제안하는 알고리즘을 광 전달망의 망 생존도를 확보할 수 있는 방안으로서 이용 가능하다는 것을 확인하였다. 그리고 시뮬레이션을 통한 성능 분석 결과, 선로 복구 방식을 이용하면 장애 복구를 위한 시간이 트래픽에 큰 영향 없이 거의 일정한 시간이 소요 됨을 확인하였다. 그러나 복구율과 생존율은 트래픽이 증가함에 따라 감소하는 경향을 보였다. 따라서, 일정 수준의 복구율 또는 생존율을 확보하기 위해서는 여유 채널 할당 방법이 중요하게 고려되어야 함을 알 수 있다. 마지막으로, 다중 링크 장애에 대처하기 위해서는 여유 채널의 할당 방식 외에 서비스를 위한 물리적인 망 구조를 잘 설계 할 필요가 있음을 알 수 있었다. 본 논문에서 제안한 복구 알고리즘이 임의의 망 구조나 망의 크기에 관계없이 적용가능하고 복구 시간 측면에서는 좋은 편이지만, 시뮬레이션 결과에 의하면 여유 채널 활용도 면에서는 만족스럽지 못한 부분을 보이고 있다. 또한 본 연구에서 제시한 복구 방식은 임의 구조의 망에 대해서도 적용할 수는 있지만, 시뮬레이션 대상으로 한 망은 한국의 백본(backbone) 망을 대상으로 하였다. 비록 망 연결도(connectivity)에 차이가 있는 두 개의 적용 망에 대한 분석을 수행하였지만, 노드 수가 많은 망에 대한 분석이 필요한 상태이다. 망 내의 일부 노드는 파장 변환이 불가능

한 OXC가 존재 할 수도 있다. 이러한 경우에도 본 논문에서 제안한 알고리즘에 대한 약간의 수정만 하면 적용 가능하다. 이외의 향후 과제로는, 장애 복구 알고리즘의 설계 요소 중 성능에 많은 영향을 줄 것으로 예상되는 파장 할당 방법 및 여유 채널 할당 방법 등에 대한 망 장애 방식의 성능 평가가 필요한 상태이다.

참고문헌

- 강철신(1997), *광 전달망의 성능 분석 (II)*, 한국전자통신연구원.
- Alexander, S. B. et al. (1993), A Precompetitive Consortium on Wide-band All-optical Networks, *Journal of Lightwave Technology*, 11(5/6), 714-735.
- Brackett, C. A. et al. (1993), A Scalable Multiwavelength Multihop Optical Network : A Proposal for Research on All-optical Networks, *Journal of Lightwave Technology*, 11(5/6), 736-753.
- Coan, B. A., Leland, W. E., Vecchi, M. P., Weinrib, A. and Wu, L. T. (1991), Using Distributed Topology Update and Preplanned Configurations to Achieve Trunk Network Survivability, *IEEE Transactions on Reliability*, 40(4), 404-416.
- Fujii, Y., Kuroyanagi, S., Chujo, T. and Hakata, A. (1999), Management on WDM Self-healing Networks, *ICC(International Conference on Communications) '99*, 1028-1033.
- Gerstel, O. and Ranaswami, R. (2000), Optical Layer Survivability : A Service Perspective, *IEEE Communications Magazine*, 104-113.
- Green, P. E. (1996), Optical Networking Update, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 14(5), 764-779.
- Hasegawa, S., Okanoue, Y., Egawa, T. and Sakauchi, H. (1994), Control Algorithms of SONET Integrated Self-Healing Networks, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 12(1), 110-119.
- Hill, G. R. et al. (1993), A Transport Network Layer Based on Optical Network Elements, *Journal of Lightwave Technology*, 11(5/6), 667-679.
- Jukan, A., Monitzer, A. and Van As, H. R. (1999), Service-specific Recovery of Wavelength Connections in WDM Networks, *OFC99*, 164-167.
- Kobrniski, H. and Azuma, M. (1993), Distributed Control Algorithms for Dynamic Restoration in DCS Mesh Networks : Performance Evaluation, *GLOBECOM93*, 1584-1588.
- Limal, E., Danielsen, S. L., Stubkjaer, K. E. (1998), Capacity Utilization in Resilient Wavelength-routed Optical Networks using Link Restoration, *OFC98*, 297-298.
- Nagatsu, N., Okamoto, S. and Sato, K. I. (1996a), Optical Path Cross-connect System Scale Evaluation Using Accommodation Design for Restricted Wavelength Multiplexing, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 14(5), 893-902.
- Nagatsu, N., Okamoto, S. and Sato, K. I. (1996b), Large Photonic Transport Network Design based on Optical Paths, *GLOBECOM '96*, 321-327.
- Pritsker, A. A. B. (1994), *SLAMSYSTEM : Total Simulation Project Support, Users Guide*, Pritsker Corporation.
- Ramamurthy, S. and Mukherjee, B. (1999), Survivable WDM Mesh Networks, Part II-Restoration, *ICC '99*, 2023-2030.
- Ramaswami, R. and Segall, A. (1997), Distributed Network Control for Optical Networks, *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 5(6), 936-943.
- Ross, S. M. (1983), *Stochastic Processes*, John Wiley & Sons, Inc.
- Sato, K. I., Okamoto, S. and Hadama, H. (1994), Network Performance and Integrity Enhancement with Optical Path Layer Technologies, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 12(1), 159-170.
- Tada, Y., Kobayashi, Y., Yamabayashi, Y., Matsuoka, S. and Hagimoto, K.

(1996), OA & M Framework for Multiwavelength Photonic Transport Networks, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 14(5), 914-922.

TIM1.394-101 (1994), *A Technical Report on Network Survivability Performance*, U.S.A T1 Committee.

Wu, T. H. (1992), *Fiber Network Service Survivability*, Artech House, Inc.

Wu, T. H. (1994), A Passive Protected Self-Healing Mesh Network Architecture and Application, *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2 (1), 40-52.

Wu, T. H. and Kobriniski, H. (1994), The Impact of SONET Digital Cross-Connect System Architecture on Distributed Restoration, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 12 (1), 79-87.



주 운 기

성균관대학교 산업공학과 학사
 한국과학기술원 산업공학과 석사
 한국과학기술원 산업공학과 박사
 한국전자통신연구원 선임연구원
 현재: 선문대학교 벤처 및 산업공학 전공 부교수
 관심분야: 통신망 프로토콜 설계, 라우팅 알고리즘, 일정계획론, 생산계획 및 통제, 생산관리 자동화



이 종 현

성균관대학교 전자공학과 학사
 성균관대학교 전자공학과 석사
 성균관대학교 전자공학과 박사
 전기통신 기술사
 현재: 한국전자통신연구원 광통신연구부 부장
 관심분야: 광네트워크, 광인터넷 기술, 광전송 시스템, 광가입자망 기술