

WDM Mesh 네트워크에서 ROADM을 이용한 멀티플-링 네트워크 설계 방안

정회원 김 일 래*, 이 성 근*, 임 태 형*, 이 명 문**
 종신회원 박 진 우*

An Algorithm for Design of a Multiple Ring Network Using ROADM in WDM Mesh Networks

Eallae Kim*, Sungkuen Lee*, Taehyung Lim*, Myungmoon Lee** *Regular Members*,
 Jinwoo Park* *Lifelong Member*

요 약

본 논문에서는 WDM 기술을 사용하는 광전달망에서 멀티플-링 구조를 임의의 토폴로지에 적용하는 설계 알고리즘을 제안한다. 특히, ROADM 기반의 노드를 이용하여, 노드 비용 최소화를 목적함수로 갖는 정수선형계획법(ILP)을 제시하고, 선형문제의 복잡성 완화를 위한 휴리스틱 알고리즘을 제안하였다. 설계 알고리즘의 타당성과 성능 측정을 위해, NSFnet 토폴로지의 망 설계 결과를 제시하고, 정적/동적 트래픽 상황 각각에 대해 비용적인 측면과 요청 트래픽 수용 측면에서 그물망 구조와 비교 분석하였다.

Key Words : Multiple ring, ROADM, WDM mesh networks, ILP Formulation, Heuristic algorithm

ABSTRACT

This paper proposes an algorithm for design of a multiple ring network that can be applied to an arbitrary topology in the WDM optical transport networks. Especially, we suggest an integer linear program(ILP) formulation with the objective of minimizing the total cost of nodes based on the reconfigurable OADM(ROADM) architecture and propose a heuristic algorithm to reduce computational complexity of the exact problem formulation. To evaluate the performance and validity of this scheme, we applied it to an NSFnet topology assuming the dynamic or static traffic condition and compared it with a mesh methodology about capacity of connection requests and the total cost of the nodes.

I. 서 론

2000년 초반에 장거리 기간 망을 위해 ROADM (Reconfigurable OADM)을 적용한 WDM 시스템이 시장에 등장한 이후, 2003년에 메트로 망을 위한 시

스템이 나오면서 ROADM 기술과 시장은 계속해서 발전하고 있는 추세이다. 이러한 발전으로 기존 Fixed OADM으로 구성되던 네트워크에서는 구현되기 힘들었던 망의 유연성과, 동적인 광경로 설정이 가능하게 되었다^[1-5]. 하지만 이와 같은 발전의 대부

※ 본 연구는 정보통신부 및 정보통신연구진흥원의 IT신성장동력핵심기술개발사업의 일환으로 수행하였음. [2006-S058-01, AII-IP기반 통합 네트워크/서비스 제어 기술 개발]

* 고려대학교 전자컴퓨터공학과 차세대 네트워크 연구실 (earhead@korea.ac.kr)

** 수원과학대학 정보통신과 (mmllee@ssc.ac.kr)

논문번호 : KICS2007-04-183 접수일자 : 2007년 4월 16일, 최종논문접수일자 : 2007년 11월 2일

본은 기존 OADM의 망 관리와 제어 측면에서의 문제점을 극복하려는 방안으로, 실제 ROADMs에 망에 적용하여 네트워크 구조를 개선하고 링과 같은 선형 망의 한계를 극복하려는 노력에는 미진하였다^{[2],[3]}.

전통적으로 그물망 구조는 정상적인 상태는 물론 장애발생 시에도 망 자원을 최대한 효율적으로 이용할 수 있는 방안으로 여겨진다. 이에 반해, 링 구조는 그물망 구조에 비해서 망구조의 비효율성은 내포하고 있지만, 망 제어/관리 측면에서의 이점, Add/Drop 다중화 구조를 바탕으로 한 간단한 노드 구조, 그리고 자기치유(self-healing) 기능을 통한 망 장애 상황에서의 높은 신뢰성을 제공할 수 있는 구조로 여겨진다^{[6],[8]}. 더욱이 링 구조는 광소자의 급격한 발전으로 망구조가 가지는 효율성 보다는 망의 안전성과 운영/관리 측면에서의 용이성을 더욱 중요한 인자로 인식함에 따라 메트로와 기간망 등지에서 계속적으로 활용되고 있다. 하지만, 이러한 장점에도 인터넷의 급속한 발전으로 망이 점차 복잡해짐에 따라 단일 링 구조를 이용한 방안은 선형 망구조로의 설계 부적합성과 우회경로로 인한 망 효율성의 급격한 저하로 타당성에 대한 한계를 나타내고 있다. 이러한 문제의 절충점으로 제안된 구조가 바로 멀티플링 구조이다^{[7],[9]}. 멀티플링 구조는 하나의 대형 링 구조를 통해 네트워크의 모든 노드를 연결하는 방법이 아니라 여러 개의 작은 링을 만들고 그 링들을 연결하여 망을 꾸미는 방안이다. 이러한 구조적 특징으로 멀티플링 구조는 그물망에 견주는 효율성과 적응성을 가질 수 있으며, 링구조의 기본 특성을 통해 망의 안전성에 대한 문제도 해결 가능하다. 또한, Add/Drop 동작 기반의 간단한 노드 구조를 적용 가능하기 때문에 비용적인 측면에서도 우위를 점할 수 있다.

본 논문에서는 이러한 멀티플링 구조를 이용하여, 임의의 토폴로지 위에서도 적용 가능한 설계 알고리즘을 제안한다. 특히, 그물망에서 사용하는 OXC 노드 구조가 아닌 ROADMs 노드 구조를 이용하여, 노드 설치비용을 최소화하는 알고리즘을 제안 하도록 한다. 제 2장에서는 멀티플링 구조의 망 설계 방안을 수학적인 정수선형계획법을 통해서 제시 하고, 제 3장에서는 제안하는 선형문제의 복잡성 완화를 위한 휴리스틱 방안을 제안한다. 제 4장에서는 정적/동적 트래픽 상황 각각에 대해 비용적인 측면과 요청 트래픽 수용 측면에서의 멀티플링 구조의 성능을 알아본다. 마지막으로 5장에서는 결론을 맺는다.

II. 수학적인 공식화

본 논문에서 설계하는 멀티플링 구조는 Wuttisittikulkij가 분류한 설계 방법 중, 단일 링만을 통해서 광경로를 설정하는 것이 아닌, 여러 개의 링들을 경유해서 광경로를 설정할 수 있는 방안에 대해 알아보도록 한다^{[6],[7]}. 먼저, 본 절에서는 이를 위해 임의의 네트워크에 대해 수학적인 공식화 방법(Integer Linear Programming: ILP)으로 멀티플링 망 구조 설계방안을 알아보도록 한다^[9]. 제안하는 선형문제는 크게 두 가지 문제로 나눌 수 있다. 첫 번째는 멀티플링 네트워크를 구성하는 링의 종류와 개략적인 링간 연결 정보를 파악하는 문제로, 총 노드 가격을 최소화 하는 방법으로 풀이한다. 두 번째 문제는 링간 연결에서 실제 연결노드를 선택 하는 문제로써, 트래픽의 총 홉 거리를 최소화 하는 것으로 풀이한다. 두 가지 문제는 순차적으로 풀이되며, 두 번째 문제는 첫 번째 문제의 결과를 이용해 풀이된다.

2.1 링 종류와 연결 링 페어 선택

멀티플링 구조의 망 설계를 위한 첫 번째 문제를 수학적으로 나타내기 위해 필요한 상수는 다음과 같다.

- 상수(Constants)

$G(V, E)$: G : 토폴로지를 나타내는 그래프, V : 노드 집합, E : 링크 집합

Λ : 시작 노드와 목적지 노드 사이의 요구되는 파장의 개수를 나타내는 트래픽 매트릭스(traffic matrix) (Λ_{sd} : 노드 $s \in V$ 에서 노드 $d \in V$ 로 파장 개수)

R^* : 토폴로지 그래프가 포함할 수 있는 링 집합, 각 링의 인덱스는 $1 \sim r_{\max} = |R^*|$

P_{sd}^* : 시작 노드와 목적지 노드 페어(s, d)사이의 경로 집합, 각 경로 집합의 인덱스는 $1 \sim p_{\max}^{sd} = |P_{sd}^*|$

binary x_n^r : 노드 $n \in V$ 이 링 $r \in R^*$ 을 구성하면 $x_n^r = 1$ 이고 아니면 0

binary u_{sd}^r : 노드 s 에서 노드 d 를 연결하는 $j \in P_{sd}^*$ 번째 광경로가 링 $r \in R^*$ 를 통과하면 $u_{sd}^r = 1$ 아니면 0

binary $v_{sd}^{r_1 r_2}$: 노드 s 에서 노드 d 를 연결하는 $j \in P_{sd}^*$ 번째 광경로가 링 $r_1 \in R^*$ 에서 링 $r_2 \in R^*$ 로 연결 지

점(interconnection)을 이용하면 $v_{sd}^{r_1 r_2 j} = 1$ 아니면 0

binary e'_{mn} : 링 $r \in R^*$ 이 링크 $(m, n) \in E$ 을 사용하면 $e'_{mn} = 1$ 아니면 0

N_l : 한 링크에서 할당 가능한 최대 링의 수

N_r : 링의 최대 사이즈, 링이 포함할 수 있는 최대 노드의 수

T_{max} : 하나의 파이버에서 사용할 수 있는 최대 파장의 수

α : ROADM(멀티플-링 노드 구조)의 초기 설치비용.

ε_1 : ROADM에서 사용하는 파장 하나가 증가할 때 발생하는 추가 비용

β : 링간 연결(OXC 혹은 ROADM을 이용한 구조)을 만들기 위한 초기 비용

ε_2 : 링간 연결노드에서 사용하는 파장 하나가 증가할 때 발생하는 추가 비용

멀티플-링 망 설계의 첫 번째 문제를 수학적으로 나타내기 위해 필요한 변수와 제약식은 다음과 같다. 여기서 변수들의 종류와 각 변수의 영역 크기에 따라 문제의 복잡도가 정해지게 되며, 결정된 변수의 값들을 통해 망을 설계한다.

- 변수(Variables)

int t_{sd}^j : 노드 s 에서 노드 d 로 $j \in P_{sd}^*$ 번째 경로를 통해 할당된 총 파장 수

binary δ^r : 링 $r \in R^*$ 이 네트워크를 구성하는데 사용되면 $\delta^r = 1$ 아니면 0

binary $\delta^{r_1 r_2}$: 링 $r_1 \in R^*$ 에서 링 $r_2 \in R^*$ 로 연결하는 지점을 만들면 $\delta^{r_1 r_2} = 1$ 아니면 0

a^r : 링 $r \in R^*$ 에 속한 노드 하나를 설치할 때 발생하는 총 비용

$b^{r_1 r_2}$: 링 $r_1 \in R^*$ 에서 링 $r_2 \in R^*$ 로 연결이 가능하도록 만드는 데 드는 총 비용

k^r : 링 $r \in R^*$ 에서 이용하는 총 파장의 수

$k^{r_1 r_2}$: 링 $r_1 \in R^*$ 에서 링 $r_2 \in R^*$ 로 스위칭 되는 총 파장 수

- 제약식(Constraints)

$$\sum_{j \in P_{sd}^*} t_{sd}^j = \Lambda_{sd} \quad \forall (s, d) \in V \quad s \neq d \quad (1)$$

$$T_{Max} \cdot \delta^r \geq \sum_{s,d} \sum_{j \in P_{sd}^*} t_{sd}^j \cdot \nu_{sd}^{jr} \quad \forall r \in R^* \quad (2)$$

$$\delta^{r_1 r_2} \leq \sum_n x_n^{r_1} \cdot x_n^{r_2} \cdot \delta^{r_1} \quad \forall (r_1, r_2) \in R^* \quad (3)$$

$$\delta^{r_1 r_2} \leq \sum_n x_n^{r_1} \cdot x_n^{r_2} \cdot \delta^{r_2} \quad \forall (r_1, r_2) \in R^* \quad (4)$$

$$T_{Max} \cdot \delta^{r_1 r_2} \geq \sum_{s,d} \sum_{j \in P_{sd}^*} v_{sd}^{r_1 r_2 j} \cdot t_{sd}^j \quad \forall (r_1, r_2) \in R^* \quad (5)$$

$$\sum_r e'_{mn} \cdot \delta^r \leq N_l \quad \forall (m, n) \in E \quad (6)$$

$$\sum_n x_n^r \cdot \delta^r \leq N_r \quad \forall r \in R^* \quad (7)$$

- 목적 함수(Objective function)

$$\min \left[\left(\sum_r \sum_n x_n^r \cdot a^r \right) + \left(\sum_{r_1, r_2} b^{r_1, r_2} \right) \right]$$

$$a^r = \alpha \cdot \delta^r + \varepsilon_1 \cdot k^r$$

$$b^{r_1 r_2} = \beta \cdot \delta^{r_1 r_2} + \varepsilon_2 \cdot k^{r_1 r_2}$$

$$k^r = \sum_{s,d} \sum_{j \in P_{sd}^*} u_{sd}^{jr} \cdot t_{sd}^j$$

$$k^{r_1 r_2} = \sum_{s,d} \sum_{j \in P_{sd}^*} v_{sd}^{r_1 r_2 j} \cdot t_{sd}^j$$

제안하는 방안의 목적함수는 망의 총 노드가격을 최소화 하는 방향으로 설계한다. 멀티플-링은 기본적으로 동일한 링 내의 트래픽 흐름과 서로 다른 링간 트래픽 흐름이 존재한다. 이러한 트래픽을 수용하기 위해, 노드구조는 각 링을 구성하기 위한 구조와 링과 링간을 연결하기 위한 노드구조로 구별할 수 있다. 이는 망의 총 노드비용을 계산하기 위해서 각각의 노드의 특성과 트래픽 흐름들을 구별하여 가격함수를 정의하여야 한다. 본 논문에서는 이러한 구별을 위해 목적함수를 크게 두 부분으로 나누어 정의 하였다. 첫 번째 부분은 각 링을 구성하는 노드의 총 비용을 나타내며, 두 번째 부분은 링과 링을 연결하기 위한 총 비용을 나타낸다. 먼저, 링을 구성하기 위한 노드 비용은 기본 설치비용(α)과 링(r)에서 사용하는 파장 수(k^r)에 의해 정의된다. 여기서 상수 α 는 ROADM 노드를 설치하기 위한 초기비용에 대한 가격상수 값이며, 상수 ε_1 은 링에서 사용하는 파장의 개수에 따라 변하는 노드의 가격상수 값이다. 즉, 목적함수는 전체 링이 포함하는 노드의 수가 증가 할수록, 또는 링에서 사용하는 파장의 수가 증가할수록 설계비용이 증가하도록 설계 하였다. 링과 링간의 연결을 위한 경비는 $b^{r_1 r_2}$ 에 의해 정의된다. 링간 연결에 대한 비용 또한, 링간 연결을 하기 위한 초기 비용(β)과 링간의 연결을 통해 흐르는 파장 수에 의해 결정된다. 이는

링간 연결이 가능한 노드가 많을수록, 링간 연결을 통해 흐르는 트래픽 흐름이 증가할수록 설계비용이 증가하도록 모델링 할 수 있다. 이러한 비용을 반영하는 목적함수와 멀티플-링 구조 특성에 맞도록 정수 계획법으로 표현하면 식 (1)~(7)과 같이 나타낼 수 있다. 식(1)는 트래픽 매트릭스에서 주어진 모든 트래픽 흐름은 설계 하려는 망에서 모두 수용되어야 함을 나타내며, 식(2)는 망에 할당된 모든 트래픽 흐름(광경로)은 설계된 링들에 의해서 모두 수용되어야 함을 나타낸다. 식(3), (4)는 링간 연결 설정을 위한 제약 사항을 나타내며, 식(5)는 링간 연결을 하도록 선택된 두 링은 그 링간 연결을 이용하는 경로의 모든 트래픽 흐름(광경로)을 수용한다는 것을 나타낸다. 식(6)과 식(7)은 한 링크(m, n)에서 포함 할 수 있는 링의 최대 개수와 링이 포함할 수 있는 최대 노드 수를 각각 N_l 과 N_r 로 제한하는 것을 나타낸다.

2.2 링간 연결노드 선택

앞서 풀이한 문제를 바탕으로 실제 링과 링간의 연결노드를 결정하기 위한 두 번째 문제를 수학적으로 나타내기 위해 필요한 상수를 다음과 같이 정의 한다.

- 상수(Constants)

R^{**} : 링 설계 문제에서 선택되어 실제 망에서 이용하는 링들의 집합 $R^{**} = \{r | r \in R^*, \delta^r = 1\}$, 링 집합의 인덱스는 $1 \sim r_{\max} = |R^{**}|$

P_{sd}^{**} : 노드 페어(s, d)의 경로 집합, 링 설계 문제에서 선택된 링과 링간 연결지점들을 이용하여 경로를 설정함, 경로 집합의 인덱스는 $1 \sim p_{\max}^{sd} = |P_{sd}^{**}|$

k^r : 링 $r \in R^{**}$ 에서 이용할 수 있는 최대 파장의 수
 $k^{r_1 r_2}$: 링 $r_1 \in R^{**}$ 에서 링 $r_2 \in R^{**}$ 로 파장 스위칭이 가능한 최대 파장 수

binary $\delta_n^{r_1 r_2}$: 링 $r_1 \in R^{**}$ 에서 링 $r_2 \in R^{**}$ 로 파장 스위칭이 가능한 연결 지점을 만들면 $\delta_n^{r_1 r_2} = 1$ 아니면 0

w_{sd}^j : 노드 s 에서 노드 d 로 $j \in P_{sd}^{**}$ 번째 경로를 이용할 경우의 총 홉 수

binary $v_{sdn}^{r_1 r_2 j}$: 노드 s 에서 노드 d 로 $j \in P_{sd}^{**}$ 번째 경로를 이용할 경우, 링 $r_1 \in R^{**}$ 에서 링 $r_2 \in R^{**}$ 로 연결하는 지점으로 노드 $n \in V$ 을 이용하면 $v_{sdn}^{r_1 r_2 j} = 1$

아니면 0

binary x_n^r : 노드 $n \in V$ 이 링 $r \in R^{**}$ 을 구성하면 $x_n^r = 1$ 이고 아니면 0

binary u_{sd}^{jr} : 노드 s 에서 노드 d 로 연결하는 $j \in P_{sd}^{**}$ 번째 광경로가 링 $r \in R^{**}$ 을 통과하면 $u_{sd}^{jr} = 1$ 아니면 0

멀티플-링 설계 두 번째 문제를 수학적으로 나타내기 위해 필요한 변수와 제약식은 다음과 같이 정의 할 수 있다.

- 변수(Variables)

int t_{sd}^j : 노드 s 에서 노드 d 로 $j \in P_{sd}^{**}$ 번째 경로를 통해 할당된 총 파장 수

binary $\delta_n^{r_1 r_2}$: 링 $r_1 \in R^{**}$ 에서 링 $r_2 \in R^{**}$ 로 연결하는 지점을 노드 $n \in V$ 에 만들면 $\delta_n^{r_1 r_2} = 1$ 아니면 0

- 제약식(Constraints)

$$\sum_{j \in P_{sd}^{**}} t_{sd}^j = \Lambda_{sd} \quad \forall (s, d) \in V \quad s \neq d \quad (8)$$

$$\sum_{s, d} \sum_{j \in P_{sd}^{**}} t_{sd}^j \cdot u_{sd}^{jr} \leq k^r \quad \forall r \in R^{**} \quad (9)$$

$$\delta_n^{r_1 r_2} \leq x_n^{r_1} \cdot x_n^{r_2} \cdot \delta_n^{r_1 r_2} \quad \forall n \in V \quad \forall (r_1, r_2) \in R^{**} \quad (10)$$

$$k^{r_1 r_2} \cdot \delta_n^{r_1 r_2} \geq \sum_{s, d} \sum_{j \in P_{sd}^{**}} v_{sdn}^{r_1 r_2 j} \cdot t_{sd}^j \quad \forall (r_1, r_2) \in R^{**} \quad \forall n \in V \quad (11)$$

$$\sum_n \delta_n^{r_1 r_2} = \delta^{r_1 r_2} \quad \forall (r_1, r_2) \in R^{**} \quad (12)$$

- 목적 함수(Objective function)

$$\min \left[\sum_{s, d} \sum_{j \in P_{sd}^{**}} w_{sd}^j \cdot t_{sd}^j \right]$$

이전 절에서는 망을 구성하는 총 노드 가격을 최소화하는 것을 목적함수로 갖는 문제를 선형계획법을 통해 링의 종류와 선택된 링 중에서 링간 연결을 설정할 링 쌍을 결정하였다. 이번 절에서는 링간 연결문제에서는 구체적으로 어떤 노드를 링간 연결노드로 결정할 것인지에 대한 문제를 선형계획법을 통해 해결하도록 한다. 실제 링간 연결노드의 결정은 이전 절에서 풀이한 비용 목적함수에는 영향을 주지는 않지만, 연결노드의 위치가 변함에 따라 트래픽의 경로가 바뀌게 되어 결국 광경로의 홉 수가 변하게 된다. 이러한 트래픽의 홉 수는 신호의 품질과 망의 효율성 측면에서 가능한 짧을수록 좋은 특성을

나타낸다. 이를 위해 본 논문에서는 연결노드의 위치 결정을 위한 목적함수로 광경로 평균 홉 수의 최소화로 정의하고 이를 선형 계획법을 통해 풀이한다. 목적함수는 w_{sd}^j 을 통해 정의 가능하며, 멀티플-링 특성에 맞는 망 설계에 대한 선형계획법 문제는 식(8)~(12)로 나타낼 수 있다. 식(8)은 주어진 트래픽 매트릭스에서 각 노드 간에 요구하는 총 트래픽은 망에서 모두 수용되어야 함을 의미한다. 하지만, 이전 절의 선형문제와는 달리 링의 종류(δ^r)와 링간 연결 문제(δ^{rs})가 이전 절의 설계 문제를 통해 결정되어, 이 문제에서는 결정된 링과 연결할 링 쌍의 정보를 바탕으로 광경로의 종류를 풀이 한다. 식(9)은 각 링이 사용할 수 있는 최대 파장 수를 k^r 로 제한하는 것을 의미하며, 식(10)은 링간 연결이 있는 두 링에서 연결노드 결정하기 위해 가능한 상황을 나타낸다. 식(11)은 링간 연결로 선택된 노드는 그 링간 연결을 지나는 모든 트래픽 흐름을 수용해야 함을 의미한다. 식(12)는 링간 연결노드의 존재와 개수에 대한 제약 사항을 나타낸다.

III. 휴리스틱(Heuristic) 방안

앞서 설명한 선형문제를 풀기 위한 기본 정보는 망을 나타내는 토폴로지, 망을 구성할 수 있는 링의 종류, 모든 시작 노드와 목적지 노드 사이의 경로와 트래픽 양에 대한 정보가 필요하며, 이러한 정보를 바탕으로 설계 목적함수에 맞도록 각 변수를 조합해야 한다. 하지만, 토폴로지가 복잡해질수록 이러한 문제는 조합문제를 바탕으로 하기 때문에 복잡도는 기하급수적으로 증가하게 된다. 여기서는 이러한 복잡도 완화를 위해, 제시된 선형문제의 가장 큰 복잡성을 가지는 경로 선택 문제에 대한 단순화 방안을 제안한다.

3.1 멀티플-링 설계 문제의 복잡성

멀티플-링 구조는 링들이 오버랩 되는 구조를 갖기 때문에, 노드와 링크에 여러 개의 링이 동시에 포함될 수 있다. 광경로를 나타내기 위해서는 어떤 노드와 링크를 경유하는지에 대한 선택뿐만 아니라 어떤 링을 통과하는지에 대해서도 나타내야한다. 이러한 확장은 2차원 그래프(그림 1-a)를 이용한 표현은 힘들며, 링이 오버랩 되는 구조와 마찬가지로 계층을 갖는 3차원적인 그래프로 나타낼 수 있다. 3차원 멀티플-링 그래프는 먼저 망이 가질 수 있는 모든 링의 종류만큼 계층을 쌓고 각 계층마다 링

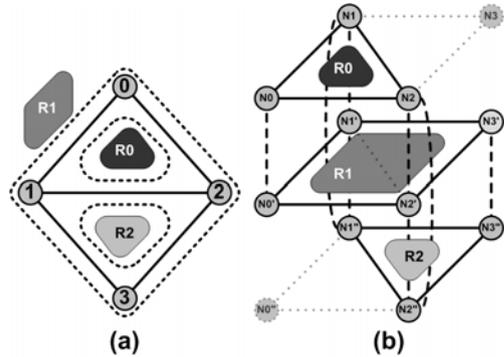


그림 1. 3차원 멀티플-링 표현 방법 (a) 예제 토폴로지, (b) 3차원 멀티플-링 표현 그래프

을 만든다. 링과 링간의 연결은 두 링이 공통으로 포함하는 노드에 한하여 링간 연결을 할 수 있다. 그래프가 생성되면 이를 바탕으로 노드 사이의 경로 집합을 만들 수 있다.

하지만 이는 기존 2차원 그래프 보다 한 차원 높은 3차원 그래프를 이용하여 경로를 찾는 것으로 노드가 많은 망의 선형문제를 푸는 것에는 한계성을 갖고 있다.

3.2 링 선택 문제의 단순화

각 노드 페어간의 경로 선택에 대한 문제를 단순화하기 위해 다음과 같은 방안을 제안 한다. 앞서 설명한 선형문제의 링과 링간 연결 설정 문제의 특성을 살펴보면, 특정 노드를 선택해야 하는 변수는 존재 하지 않고, 모든 변수는 경로 상에 어떤 링과, 어떤 링간 연결을 선택 할 것인지에 대한 문제로 이루어져 있다. 이는 링에 속한 노드들을 경유해서 통과할 것인지에 대한 문제는 블랙박스라고 하고 단순히 링에 포함된 노드 수와 링에서 사용된 총 파장 수를 통해서 가격함수를 정의하기 때문이다. 이러한 특징을 이용하기 위해 링 정보만을 갖는 그래프(이후부터는 ‘링그래프’로 호칭함)를 그림2와 같이 나타낼 수 있다. 링그래프는 망이 포함하는 노드 (N0, N1, N2, N3), 망을 구성하기 위해 선택된 링 종류(R0, R1, R2), 그리고 이들 사이의 연결들로 이루어진다. 링과 노드와의 연결은, 링이 포함하는 노드를 나타내기 위해 링이 포함하는 모든 노드와 연결한다. 링간 연결은 링간에 광경로가 가능한 모든 연결을 만든다. 즉 두 링 모두에 포함되는 노드가 하나 이상이 있을 경우, 그 두 링 사이의 연결을 설정한다. 완성된 그래프는 멀티플-링 구조하에서 링 단위의 연결성으로 간소화 하여 망을 나타낼

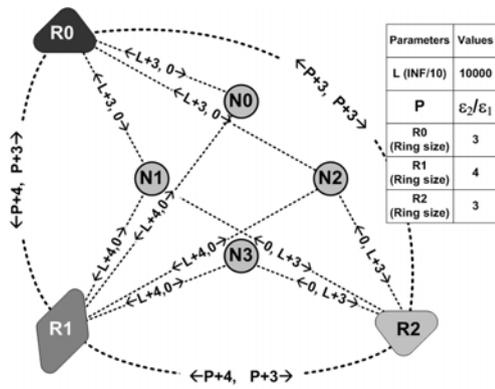


그림 2. 링 선택문제의 링그래프

수 있다. 앞서 노드 단위의 경로 선택 문제를 링 단위로 단순화 하여, 문제의 복잡성을 근사화 없이 간소화 할 수 있었다. 하지만 링 단위의 경로선택 문제 역시 각 노드 페어 사이의 경로를 선택하기 위해서는 링 단위의 경로 조합을 통해, 최적값을 찾는 복잡한 문제로 귀결 된다. 본 논문에서는 이러한 경로 선택에 대한 문제를 더욱 단순화하기 위해 다음과 같은 방법을 제안한다.

제안하는 방법은 링단위 경로들의 조합을 통해 최적값을 찾는 것이 아니라, 목적함수에 부합되도록 링그래프의 링크 값을 정의하고, 그 그래프에서 짧은 패스를 찾음으로서 풀이 한다. 링그래프의 링크 값 설정은 다음과 같다. 먼저 가능한 여러 링 조합 중 선택된 하나의 링 조합에 대해 링그래프를 정의 한다. 정의한 링그래프의 노드와 링간의 링크와 링과 링간의 링크를 망 노드비용을 최소화 하도록 하는 목적함수에 부합하도록 설정 한다. 이는 링크의 값이 그 링에 파장이 할당될 경우, 생기게 되는 추가적인 비용을 반영하게 되며, 이를 위해 노드에서 링으로 가는 링크에 대해서는 선택하려는 링의 크기로 정의한다. 이와 비슷한 방법으로 링간의 링크 또한 기본적으로 이동하려는 링의 크기로 정의하고 추가적으로 링과 링간의 링크에는 링간 파장 스위칭을 위한 추가적인 비용이 소모 되므로 그러한 비용을 반영하기 위해 P 값을 더하여 정의한다. P 의 정의는 ϵ_2/ϵ_1 로 정의 하며, 이는 하나의 파장을 노드에서 추가하는데 드는 비용(ϵ_1)과 링간 스위칭하는데 발생하는 비용(ϵ_2)의 상대적인 비용을 의미 한다. 이 밖에 링에서 노드로 가는 연결은 모두 0을 넣도록 한다. 마지막으로 설정한 링그래프의 실

제 짧은 패스 찾기(shortest path: Dijkstra's algorithm 이용)를 위해, 노드에서 링으로 가는 링크에 추가적으로 큰 수($L=INF/10$)를 더한다(선택 경로상에서 노드는 시작과 끝에서만 존재). 이러한 링크 설정으로 그림3과 같은 링그래프를 완성할 수 있다. 짧은 패스 찾기는 Dijkstra's 알고리즘을 이용하여 노드 페어간의 경로를 찾는다. 한 예로 그림 2에서 노드 $N0(src)$ 에서 노드 $N3(dst)$ 으로 가는 가능한 경로는 링 $R0$ 와 링 $R2$ 를 이용하는 경로 $N0 \rightarrow R0 \rightarrow R2 \rightarrow N2$ (거리: $L+3 + P+3$)와 링 $R1$ 만을 이용하는 경로 $N0 \rightarrow R1 \rightarrow N3$ (거리: $L+4$)가 있다. 이 두 경로 중에 링 $R1$ 만을 이용한 경로를 짧은 패스로 선택하도록 한다. 이러한 결과를 선형계획법의 목적함수와 비교해 보면, 목적함수의 작은 링과 적은수의 링간 연결을 경유하는 광경로를 선호하는 특성과 일맥상통함을 알 수 있다.

하지만 이와 같은 경로선택은 링간 연결이 가능한(두 링 모두에서 포함되는 노드가 하나 이상 있을 경우) 모든 연결을 경로 설정에서 가능하도록 가정한 결과로 링간 스위칭이 가능한 링 페어 선택을 위한 방법이 필요하다. 방법은 주어진 노드 페어간 트래픽(광경로)을 모두 할당 하고, 각각의 링간 연결을 통한 트래픽양을 확인한다. 이 중, 사용하지 않는 링간 연결은 제거하고 남은 연결에 대해서만 링간 연결로 정의 하는 것이다. 이러한 풀이는 링간 연결설정 문제를 독립적인 하나의 문제로 풀이 하지 않고 경로 설정 문제의 결과물을 통해 해결하였다. 때문에 문제의 복잡성은 현저히 낮아졌지만, 목적함수에 최적화된 해법에서는 어느 정도 차이가 날 수 있다.

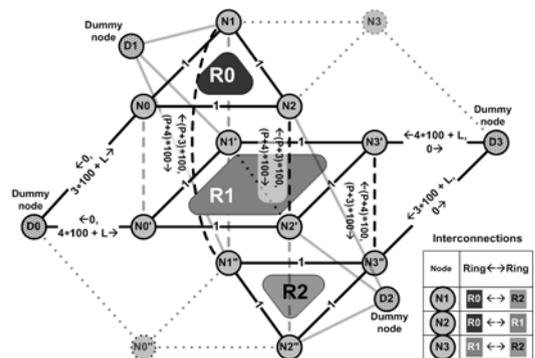


그림 3. 링간 연결노드를 찾기 위한 계층 링그래프

3.3 링간 연결노드 선택 문제의 단순화

멀티플-링 네트워크를 설계하기 위해서 앞 절에서는 망을 구성할 링 종류와 링간 파장 스위칭이 가능한 링 페어를 선택하였다. 이번 절에서는 실제로 링간의 연결을 위해 어떤 노드에서 파장 스위칭이 가능하도록 할 것인지에 대한 휴리스틱 방법을 제안하도록 한다. 연결노드의 선택은 트래픽(광경로)의 총 홉 거리의 최소화를 목적으로 한다. 이는 링 단위의 그래프가 아닌 실제 노드 단위의 그래프를 이용해야 하며, 앞서 링 종류 선택 문제의 결과를 이용하여 링내 실제 노드단위의 경로를 선택한다. 새롭게 정의하는 그래프는 그림 1-(b)와 같은 계층적인 그래프를 바탕으로 목적함수에 부합하도록 그래프의 링크 값들을 정의한다. 이때 앞 3.2절 결과의 링 단위 경로는 그대로 수용하며, 노드단위의 경로선택은 새롭게 완성된 그래프를 이용한다. 먼저, 각 계층의 링크는 선택된 링의 노드간 거리로 설정한다. 그리고 계층 그래프에서의 경로의 시작과 끝을 나타내기 위해 가짜 노드(dummy node: $D0=N0, D1=N1, D2=N2, D3=N3$)를 만든다. 이후 가짜 노드($D0$)와 링에 속한 실제 노드($N0, N0'$)와 연결하고 그 링크의 값은 이동하려는 링의 크기에 100을 곱한 값에 큰 수($L=INF/10$)를 더하여 정의한다. 여기서 링의 크기에 100(100이 아닌 다른 큰 수를 더해도 문제없음)을 곱한 이유는 앞서 언급했듯이 링 그래프를 이용한 링 경로선택 결과와 같은 링 경로를 유지한 상태에서 노드간의 경로를 선택하기 위함이다. 링과 링간의 연결도 앞 절의 링그래프의 링크 값에 100을 곱한 값으로 정의한다. 동일한 방법으로 모든 링크의 값을 설정하면, 앞 절의 링그래프와 같은 링 경로를 선택 하면서 링내의 노드의 경로를 나타낼 수 있는 그래프(이후부터는 ‘계층링그래프’로 호칭함)를 완성 할 수 있다.

계층링그래프를 이용한 링간 연결노드 선택 문제는 링간 연결노드가 가능한 모든 조합에 대해 짧은 패스 찾기(shortest path: Dijkstra’s algorithm 이용)를 통해 트래픽 할당 후, 총 홉 거리가 가장 작은 연결노드 조합을 찾는다. 하지만 이러한 방법은 링간 연결이 많아질수록 문제의 복잡성은 크게 증가하게 된다. 이러한 복잡성 완화를 위한 방법은 모든 노드에서 링간 연결이 가능하도록 링크를 설정하고 선택하려는 특정 링간 연결노드에 대해서 차례로 연결노드를 바꾸어 가며, 그 중 가장 작은 총 홉 거리는 만드는 노드를 그 링간 연결노드로 선택하는 것이다. 이러한 과정을 모든 링간 연결에 대해 반복

수행함으로써 망의 실질적인 링간 연결노드를 선택할 수 있다.

IV. 멀티플-링 구조의 설계 결과와 성능분석

4.1 정적 트래픽 실험

본 논문에서는 제안된 설계방안의 성능 분석을 위해 14개의 노드와 23개의 링크를 갖는 NSFNet 형상을 이용한다. 트래픽 흐름은 서로 다른 모든 노드 페어간 단일 파장을 요청하는 것으로 가정 하고 망의 노드비용을 계산하기 위해 표1과 같은 파라미터로 망을 구성한다.

표 1. 시뮬레이션 파라미터

Parameter	값	Parameter	값
노드 수(N)	14	α/β	3
링크 수(L)	23	ϵ_1/ϵ_2	3
링크당가능 링 수(N_l)	2	α/ϵ_1	20
파이버당 가능 파장 수(T_{max})	60	β/ϵ_2	20
링의 최대 크기 (N_r)	7		

그림4는 NSFnet 토폴로지에서 구성 가능한 링의 종류를 나타내며, 이를 바탕으로한 설계 결과는 그림5에서 보여준다. 결과에서는 R3, R10, R14, R20, R25의 5개 링을 이용하여 멀티플-링을 구성하게 되며, N10(R20<->R25), N4(R3<->R20), N3(R14<->R3), N9(R3<->R10)의 4개 노드가 링간 파장 스위칭을 위한 노드로 선택된다. 이러한 결과는 목적함수의 4가지 상수 값($\alpha, \beta, \epsilon_1, \epsilon_2$)에 따라 변하는데, 그 상수의 변화에 따른 네트워크 의 총 노드 비용을 그림7에서 보여준다.

Ring	# of Nodes	Description	Ring	# of Nodes	Description
0	7	0, 1, 2, 5, 4, 8, 9	15	7	3, 4, 5, 6, 10, 11, 12
1	7	0, 1, 2, 5, 6, 10, 9	16	6	3, 4, 5, 6, 10, 12
2	6	0, 1, 3, 4, 5, 2	17	7	3, 4, 5, 6, 10, 13, 12
R3	6	0, 1, 3, 4, 8, 9	18	7	3, 4, 5, 7, 13, 10, 12
4	6	0, 1, 3, 12, 10, 9	19	6	3, 4, 5, 7, 13, 12
5	7	0, 1, 3, 12, 11, 10, 9	19	7	3, 4, 8, 9, 10, 11, 12
6	7	0, 1, 3, 12, 13, 10, 9	R20	6	3, 4, 8, 9, 10, 12
7	7	0, 2, 1, 3, 4, 8, 9	22	7	3, 4, 8, 9, 10, 13, 12
8	7	0, 2, 1, 3, 12, 10, 9	23	6	4, 5, 6, 10, 9, 8
9	6	0, 2, 5, 4, 8, 9	24	7	4, 5, 7, 13, 10, 9, 8
R10	6	0, 2, 5, 6, 10, 9	R25	7	5, 6, 10, 11, 12, 13, 7
11	7	0, 2, 5, 7, 13, 10, 9	26	6	5, 6, 10, 12, 13, 7
12	5	1, 2, 5, 4, 3	27	5	5, 6, 10, 13, 7
13	7	1, 2, 5, 6, 10, 12, 3	28	4	10, 11, 12, 13
R14	7	1, 2, 5, 7, 13, 12, 3			

그림 4. NSFnet 토폴로지에서 구성 가능한 링의 종류(Nr=7)

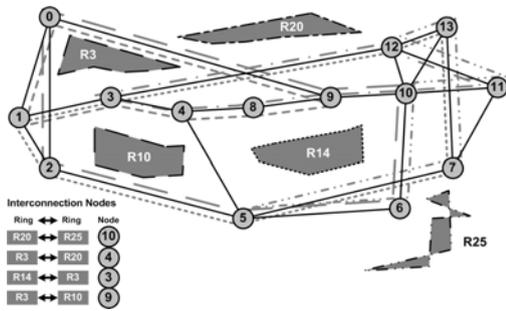


그림 5. 멀티플링 네트워크 설계 결과(NSFnet 토폴로지)

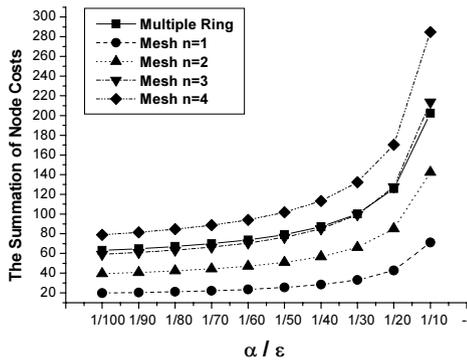


그림 6. 초기 비용과 과장당 추가비용 비에 따른 총 노드 비용(NSFnet)

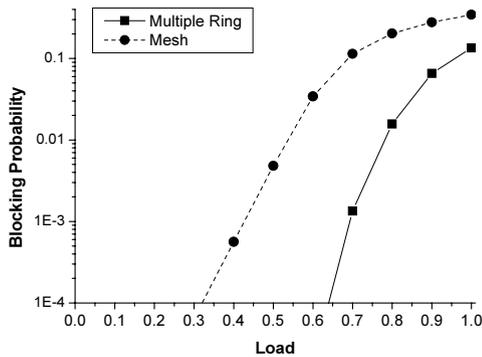


그림 7. 망의 부하에 따른 블로킹 확률(n=3)

또한 그림7은 멀티플링 구조와 그물망 구조로 설계한 망의 설계비용 차이를 보여주는데, 실선으로 나타낸 부분은 ROADМ을 이용한 멀티플링 구조에 대한 결과를 나타내고, 나머지 결과는 ROADМ의 가격과 OXC(그물망의 노드 구조)의 가격을 1:n

로 놓았을 때, 그물망 구조와 멀티플링 구조의 상대적인 총비용을 나타낸다. 결과의 대부분에서 ROADМ 가격이 OXC의 가격보다 3배 이상 저렴하다면, 멀티플링 구조가 노드 설치비용 측면에서 우위를 점함을 알 수 있다.

4.2 동적 트래픽 실험

동적 트래픽을 가정한 실험은 앞서 정적 트래픽 흐름에 따른 망설계 이후, 광경로가 새롭게 생성, 절체될 때, 제안된 방식으로 설계된 멀티플링 구조(ROADМ을 파장 재설정 동작 이용)의 동적 트래픽 수용능력을 측정하였다. 멀티플링 구조의 망 설계를 위한 평균적인 트래픽 경향은 4.1 소절의 정적 트래픽 흐름과 동일하며, 이를 바탕으로 동적인 광경로 요청에 관한 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. 동적인 광경로의 요청분포는 포아송(Poisson) 분포를 가정 하였다. 망 설계 시 주어진 정적 트래픽 흐름과 같은 경향으로 동적인 광경로를 요청하기 위해, 같지 않은 임의의 두 노드를 선택 후, 파장 단위로 임의의 시점(arrival rate: λ)부터 유지시간(service rate: μ)동안 Constraint Shortest Path First(CSPF) 알고리즘으로 광경로를 찾고 생성 유지 하였다. 망 설계는 정적 트래픽 매트릭스의 평균 트래픽 양으로 설계하였기 때문에, 정적 트래픽 매트릭스의 트래픽 양을 망의 최대 부하(100%)로 정의 하고, 동적 트래픽 상황의 망 부하(ρ)를 식(13)과 같이 정의 하였다.

$$\rho = \frac{\lambda}{\mu \cdot \sum_{sd} \Lambda_{sd}} \quad (13)$$

여기서 평균 유지 시간(μ)을 단위시간(1)으로 고정할 경우, 광경로 요청 빈도는 식(14)로 나타낼 수 있다.

$$\lambda = \rho \cdot \sum_{sd} \Lambda_{sd} \quad (14)$$

동적 트래픽 상황에서 멀티플링 구조의 트래픽 수용능력 분석을 위해, 그림8은 망의 부하에 따른 블로킹 확률을 그물망 구조(OXC: n=3)와 비교하였다. 결과는 같은 망 비용을 사용할 경우, 멀티플링 구조가 그물망 구조 보다 광경로 블로킹 확률에서 더욱 좋은 성능을 나타냄을 확인 할 수 있다. 이러

한 결과는 기본적으로 멀티플-링 구조에서는 링 단위로 파장을 할당하고, 또한 ROADM의 가격이 OXC의 가격보다 싸기($n=3$) 때문에 같은 비용에 멀티플-링 구조가 그물망 구조보다 링크 측면에서 더욱 많은 파장을 사용하기 때문이다.

V. 결론

본 논문에서는 링과 그물망 구조의 장점을 절충 수용한 멀티플-링 구조에 대해, 노드 비용의 최소화를 목적으로 한 설계 기법을 제안하였다. 특히, 본 논문에서는 멀티플-링의 구조적 특징을 인지하여 망 설계를 위한 수학적 선형 계획법과, 링 종류와 링 간 연결노드 선택문제에 대해 휴리스틱 방안을 제시 하였다. 휴리스틱 방안에서는 링그래프와 계층링그래프를 새롭게 정의하여, 경로선택 문제를 라우팅 문제로 귀결시켜 조합문제의 복잡성을 단순화시켰다. 성능 실험에서는 NSFnet 토폴로지를 이용하여 실제 멀티플-링 구조의 망을 설계 하였으며, 정적/동적 트래픽 상황에서 그물망 구조와 비교를 통해 노드비용과 동적 트래픽 수용능력 측면에서의 우수성을 확인하였다.

이와 같은 실험결과를 통해 미루어 볼 수 있듯이, 본 고에서 제안하는 멀티플-링 설계 방안은 링 구조의 안전성과 그물망 구조의 효율성, 그리고 망 설계 비용의 경제성 모두를 두루 갖춘 멀티플-링 구조의 한 설계 방안으로, 추후 이와 같은 연구 및 실제 망 설계에서 이용 될 수 있을 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

[1] W. Cho and B. Mukherjee, "Architecture and protocols for packet communication in optical WDM metropolitan-area ring networks using tunable wavelength add-drop multiplexers," *Optical Network Mag.*, vol.4, no. 5, Sep./Oct. 2003.

[2] H. Zhu, "Online Connection Provisioning in Metro Optical WDM Networks Using Reconfigurable OADMs," *J. Lightwave Technol.*, vol. 23, no. 10, Oct. 2005.

[3] P. Risbood, C. Nuzman, N. Nithi, and S. Patal, "ROADM Enabled Optimization in WDM Rings," in *Proc. OFC 2005*, v1o.3, Mar. 2005.

[4] L. Eladada, "Advances in Optoelectronic Technologies for ROADM Subsystems," *Wireless and Optical Commun Conf.*, April pp. 22-23, 2005.

[5] Infornetics Networks, "ROADM Evolves," <http://www.Infornetics.com>, 2006.

[6] R. Ramaswami, K. N. Sivarajan, *Optical Networks: A Practical Perspective*, San Mateo, CA: Morgan Kaufmann., 2002.

[7] L. Wuttisittikulki and, O'Mahony, M.J. "Design of a WDM network using a multiple ring approach," in *Proc. GLOBECOM'97*, Vol. 1, pp. 551-555, Nov. 1997.

[8] L. Wuttisittikulki and, O'Mahony, M.J. "An algorithm for the design of a survivable multi-wavelength network using a multiple ring approach," *Integrated Optics and Optical Fibre Commun.*, vol. 2, pp. 131-134, 1997.

[9] A. Fumagalli, I. Cerutti, I. M. Tacca, "Optimal design of survivable mesh networks based on line switched WDM self-healing rings," *IEEE/ACM Trans. Networking*, vol. 11, pp. 501-512, June 2003.

김 일 래 (Eallae Kim)

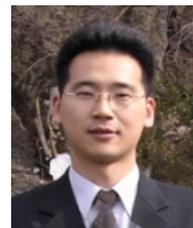
정회원



2003년 8월 고려대학교 전자 및 정보공학과 학사
2006년 3월 고려대학교 전자공학과 석박사통합수료
<관심분야> 광통신, 광통신망 설계, IP mobility

이 성 근 (Sungkuen Lee)

정회원



2004년 2월 고려대학교 전기전자공학공학과 학사
2004년 3월 고려대학교 전자공학과 석박사통합수료
<관심분야> 광통신, 무선통신공학, IP mobility

임 태 형 (Taehyong Lim)

정회원



2005년 8월 고려대학교 전기전자
전파공학부 학사
2007년 6월 고려대학교 전자전기
공학부 석사과정
<관심분야> 전자공학, 무선통신
공학

박 진 우 (Jinwoo Park)

종신회원



1979년 2월 고려대학교 전자공학
과 학사
1983년 8월 클렘슨대학교 전자공
학과 석사
1987년 11월 버지니아 주립대학
교 박사
1988년 3월~1989년 2월 명지대
학교 전자공학과 교수

이 명 문 (Myungmoon, Lee)

정회원



1991년 2월 고려대학교 전자전
산공학과 학사
1993년 2월 고려대학교 전자공
학과 석사
1993년~1996년 LG전자 멀티미
디어연구소 주임연구원
2002년 2월 고려대학교 전자공

학과 박사

2003년 3월~현재 수원과학대학 정보통신과 조교수

<관심분야> 광통신망, 데이터통신망

1989년 3월~현재 고려대학교 전자공학과 교수

<관심분야> 무선통신공학, 광통신공학, 광통신망