

# 순열 방사형 광 통신망 : 다중 홉 광 통신망을 위한 순열 방사형 그래프의 응용

(Arrangement Lightwave Network : An Application of Arrangement Graphs to Multihop Lightwave Network)

김 원<sup>†</sup> 전문석<sup>\*\*</sup>

(Won Kim) (Moon-Seog Jun)

**요약** 순열 방사형 그래프는 다중 홉 광 통신망을 설계하고자 할 때 요구되는 설계 요구사항(예를 들면 노드/간선의 대칭성, 낮은 직경, 경로 배정의 간단성 등)을 만족시킬 수 있는 여러 특성을 가지고 있다. 본 논문에서는 다중 홉 광 통신망의 새로운 논리적 토폴로지로서 순열 방사형 그래프 모델을 기반으로 하는 순열 방사형 광 통신망을 제안한다. 제안한 구조에서는 다중 스타 커플러의 사용과 망의 그룹화를 통해서 파장 재사용성, 확장성을 향상시켰다. 또한 기존 관련 연구와의 비교 분석을 통해서 제안한 구조가 제한된 파장수로 좀더 많은 노드의 수용을 요구하는 응용분야에 사용될 수 있는 대안 논리적 토폴로지임을 보였다.

**Abstract** Arrangement graph has desirable properties for design requirements of a multihop lightwave network, such as node and edge symmetry, low diameter, simple routing, etc. In this paper, arrangement lightwave network based on arrangement graph model is proposed as new logical topology of multihop lightwave network. In the proposed scheme, multistar and grouping of network are used for improving reusability of wavelength and scalability. Also, this paper shows that the proposed scheme is an alternative logical topology for application requiring more nodes with limited wavelengths by evaluating performance with related works.

## 1. 서론

WDM은 광 섬유의 방대한 대역폭을 이용할 수 있고 많은 사용자가 동시에 다른 파장을 이용해서 정보를 전송할 수 있는 효율적인 방법임이 증명되었다[1]. 이러한 WDM 광 통신망은 단일 홉[2]과 다중 홉[3] 광 통신망으로 분류할 수 있는데 단일 홉 광 통신망은 메시지를 어떠한 중간노드의 경유없이 한번에 근원지에서 목적지까지 전송이 가능하다. 그러나 사용자간의 동적인 전송 관리와 빠르게 튜닝할 수 있는 송/수신기를 요구할 뿐 아니라 사용자의 수가 제한되는 단점을 가지고

있다. 다중 홉 광 통신망은 사용자 스테이션들과 스타 커플러와같은 수동 광 소자들로 구성된다. 각 사용자 스테이션은 광 섬유와 연결되는 많은 송/수신기를 가지고 있으며 각 송/수신기는 특정 주파수에 고정되어 있거나 여러 주파수를 튜닝 할 수 있다. 각 사용자 스테이션은 다중 사용자로부터 여러홉을 거쳐서 정보를 주고 받을 수 있는데 이때 중간 사용자 스테이션은 목적지 사용자 스테이션에 도달할 때까지 각 스테이션에서 새로운 파장으로 정보를 변환한후 재 전송 한다. 단일 홉 광 통신망과는 달리 송/수신기의 빠른 튜닝이 필요 없을 뿐만 아니라 어떠한 사전상호 협약도 요구되지 않는 장점을 가지고 있다. 다중 홉 통신망의 중요 특성으로는 논리적 토폴로지와 물리적 토폴로지가 서로 독립적이라는 것이다. 물리적 토폴로지는 통신망이 어떻게 구현되었는가로써 스타, 링, 버스, 메쉬등이 될 수 있다. 논리적 토폴로지는 파장 할당에 의한 노드의 연결로써 정의되며 일반

<sup>†</sup> 정 회 원 : 전주기전여자대학 컴퓨터과 교수  
wkim@kns.kijcon-c.ac.kr

<sup>\*\*</sup> 종신회원 : 송실대학교 정보과학대학 교수  
mjun@computing.soongsil.ac.kr

논문접수 : 1998년 2월 23일

심사완료 : 1999년 11월 30일

적으로 정규 그래프 모델을 기반으로 한다. 이러한 정규 토폴로지를 이용하여 다중 홉 광 통신망 구조를 설계할 때는 다음 요구사항을 만족하여야 한다. 첫째 패킷이 목적지에 도달하기전에 여러 홉을 통해서 전송되므로 통신망 용량의 많은 부분을 낭비하게된다. 즉 다중 홉 통신망의 이용율에 반비례 관계를 갖으므로 가능한 평균 홉 수를 최소화하는 것이 중요하다. 둘째 통신망에 있는 각 노드는 가능한 적은 수의 송/수신기만을 이용하여야만 하며 또한 각 노드에서 요구되는 송/수신기의 수는 망의 성장과는 무관해야만 한다. 셋째 통신망의 구성과 성능에 미치는 영향을 작게하기 위해서 한 번에 추가하거나 삭제하는 노드 수를 최소화하여야 한다. 넷째 각 노드는 초당 수 백만개의 패킷을 처리하도록하기 위해서 경로 배정 절차가 간단해야만 한다. 지금까지 위의 설계 요구사항을 만족시키기 위하여 정규 그래프 모델을 기반으로하는 많은 방법들이 제시되었는데 perfect shuffle을 이용한 shuffleNet[4], de Bruijn 그래프를 이용한 de Bruijn 통신망[5], hypercube를 이용한 hypercube 통신망[6], torus를 이용한 MSN[7], Cayley 그래프를 이용한 CayleyNet[8]등이 연구되었다. 그러나 이러한 논리적 토폴로지들은 구조적 특성상 단점들을 가지고 있는데 shuffleNet과 de Bruijn 통신망은 비대칭적 전송거리를 가지며 hypercube 통신망은 노드에 대한 간선의 급격한 증가와 낮은 이분율을 가지며 MSN은 노드의 증가에따라 상대적으로 직경이 매우 크게 증가하며 CayleyNet은 경로 배정방법이 매우 복잡하다는 것이다.

따라서 본 논문에서는 순열 방사형 그래프 모델을 기반으로하는 새로운 정규 다중 홉 통신망구조인 순열 방사형 광 통신망을 제안한다. 제안된 구조는 추가 하드웨어 비용을 최소화한다는 측면에서 다중 스타 커넥터를 이용한 설계 방법을 제시하여 파장 재사용성을 향상시켰으며 계층적 망의 그룹화를 통해서 확장성을 향상시키는 방법을 제시하였다. 논문의 구성은 2장에서 제안한 순열 방사형 광 통신망을 정의 하고 3장에서는 순열 방사형 광 통신망을 다중 스타 커넥터를 이용한 임베딩 방법에 대해서 기술하고 4장에서는 순열 방사형 광 통신망의 확장성을 향상 시킬 수 있는 방법을 기술하며 5장에서 기존 논리적 토폴로지와 성능을 비교할 것이며 6장에서 결론을 기술한다.

## 2. 순열 방사형 광 통신망

방사형 그래프(star graph)는 현재까지 널리 사용되고 있는 n-큐브보다 여러 가지 측면에서 우수한 특성을

보이면서 n-큐브를 대신할 수 있는 새로운 대안으로 제시되고 있다. 그러나 n-차원 방사형 그래프는 차원 n이 증가함에 따라 노드의 수가 n!로 급격히 증가하는 단점을 갖고 있다. 최근에는 n차원 방사형 그래프의 단점을 제거한 순열 방사형 그래프가 제안되어 활발히 연구되고 있다[9]. 방사형 그래프는 순열 방사형 그래프의 특수한 형태의 그래프라는 측면에서 순열 방사형 그래프를 방사형 그래프의 일반적인 형태라고 할 수 있다.

$1 \leq k \leq n-1$ 을 만족하는 두 정수를 n과 k라 하고 집합  $\langle n \rangle$ 과  $\langle k \rangle$ 는  $\langle n \rangle = \{ 1, 2, \dots, n \}$ ,  $\langle k \rangle = \{ 1, 2, \dots, k \}$  라고 하고 또한 집합  $\langle n \rangle$ 에 있는 n개의 순열들의 집합 중에서 한번에 k개를 취하는 순열의 집합을  $P_k^n$ 라 할 때, 순열 p에 있는 k개의 구성 요소들은  $p_1, p_2, \dots, p_k$ 로 표시하고  $p = p_1 p_2 \dots p_k$ 라고 쓴다.

정의 2.1 : 순열 방사형 광 통신망 그래프  $ANet_{n,k} = (V, E)$ 는 다음과 같이 구성된다.

$$V = \{ p_1 p_2 \dots p_k \mid \langle n \rangle \text{의 } p_i \text{ 그리고 } i \neq j \text{일 때 } p_i \neq p_j \}$$

$$E = \{ (p, q) \mid p, q \text{는 } V \text{의 원소, } \langle k \rangle \text{에 있는 } i \text{에 대해서 } j \neq i \text{일 때 } p_i \neq q_i, p_j = q_j \}$$

즉,  $ANet_{n,k}$ 의 노드들은 n개의 구성 요소에서 k개의 구성 요소만을 이용한 배열이며,  $ANet_{n,k}$ 의 간선들은 k개의 위치 중에서 정확히 한 위치가 다른 노드 배열과 연결된다.

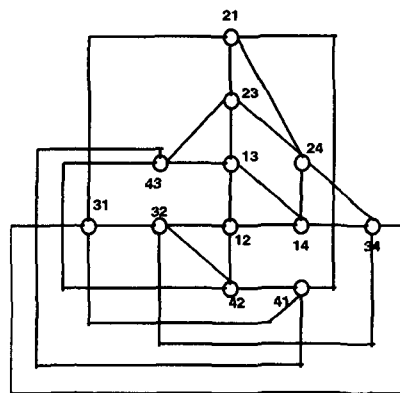


그림 1 순열 방사형 광 통신망의 예 ( $ANet_{4,2}$ )

순열 방사형 광 통신망은 대칭적이고 재귀적인 위상 구조를 가지고 있으며 성질은 다음과 같다

1)  $ANet_{n,k}$ 는  $\frac{kn!}{2(n-k-1)!}$  개의 간선을 가지고 있으며 직경은  $\lfloor \frac{3}{2}k \rfloor$  이다. 2)  $ANet_{n,k}$ 는 노드 및 간선 대칭성을 가지고 있으며 각 노드의 간선의 수는  $k(n-k)$  이다. 3)  $ANet_{n,k}$ 에 있는 임의의 두노드사이에는  $k(n-k)$  개의 다중 경로가 존재한다. 그러므로  $ANet_{n,k}$ 는 오류 허용 특성을 갖는다. 4)  $ANet_{n,k}$ 의 라우팅은 간단하며 비 집중적 방법으로 수행된다. 그림 1은 순열 방사형 광 통신망의 예를 보이고 있다.

### 3. 다중 스타 커플러를 이용한 순열 방사형 광 통신망의 구현

순열 방사형 광 통신망을 물리적으로 구현하는 한 가지 방법은 단일 수동 스타 커플러를 사용하는 *broad-cast-and-select* 구조이다. 이러한 구조에서는 전송을 위해서 각 노드에게 하나 이상의 파장 채널이 할당된다. 그리고 스타 커플러는 모든 파장 채널을 통합한다음 다시 모든 노드들에게 브로드캐스트한다. 그런다음 각 노드는 논리적 위상에서 정의된것처럼 자신의 논리적 연결성에 따라 적절한 채널들을 선택한다. 단일 수동 스타 커플러를 이용하여  $ANet_{n,k}$ 를 구현하기 위해서는  $\frac{kn!}{2(n-k-1)!}$  개의 파장채널이 필요하다. 이 단일 스타 커플러 구현의 장점은 모든 노드들이 사용중에 있는 완전한 파장채널 스펙트럼을 접근할 수 있는 튜닝 가능한 송/수신기를 가지고 있다면 논리 토폴로지가 변화하는 트래픽 형태에 따라 재구성될 수 있다는 것이다. 그러나 단일 스타 커플러는 WDM 수동 스타 커플러 통신망의 대역폭을 제한 함으로써 시스템의 크기를 한정하는 몇 가지 중요한 요소들이 존재한다. 따라서 다중 스타 구성이 필수적이며 해결을 위한 유일한 방법으로 대규모 근거리 통신망 또는 망이 커질 때 선택할 수 있는 가장 자연스러운 방법인 것이다. 다중 스타 통신망은 다수의 수동 스타 커플러로 구성되어 있다. 각 노드들이 다른 파장을 할당함으로써 다른 커플러와 연결할 수 있다. 이러한 각 커플러에서의 파장 재사용이 다중 스타를 통해서 더 많은 사용자가 사용할 수 있도록 허락한다. 부가적으로 다중 커플러를 사용하면 각 커플러는 좀더 작은 크기를 가질 수 있으므로 단일 수동 스타 커플러를 사용하는 경우보다 복잡하지도 않고 각 커플러에서의 전력 분리 비율이 줄어들 뿐아니라 전력 규모 제한도 완화될 수 있다. 그러나 다중 스타 커플러를 사용하는 통신망에서는 단일 스타 통신망에서와 같은 동일한 재구성 자유도를 갖지 못한다.

### 3.1 사용되는 표기들

우리는 이미 순열 방사형 광 통신망  $ANet_{n,k}$ 의 특별한 위치  $r (2 \leq r \leq k)$ 에 각각 다른 값  $i (1 \leq i \leq n)$ 를 고정 시키므로써 부 순열 방사형 광 통신망  $ANet_{n-1,k-1}$ 을 구성할 수 있음을 알았다.  $r$ 이 2에서  $k$ 사이의 값을 갖을 수 있으므로 다양한 부 통신망 계층도를 얻을 수 있다. 다음의 정의는 고정된 위치가  $r = k$ 이고 대응되는 부 순열 방사형 광 통신망을  $ANet_{n-1,k-1}(i_k)$ 로 표시한다고 가정한다. 여기에서  $ANet_{n-1,k-1}(i_k)$ 의 각 노드는  $k$ 번째 위치에  $i$ 값을 갖는다는 것을 의미하며 이들 부 순열 방사형 통신망들은  $i$ 차원 간선에 의해서 연결된다. 두 개의 부 순열 방사형 광 통신망사이에는  $\frac{(n-2)!}{(n-k-1)!}$  개의 간선을 가지고 있으며 이것을 간선 집합이라 부른다. 이러한 간선 집합은 모든 부 순열 방사형 광 통신망의 연결을 생각할 때 총  $\frac{n(n-1)}{2}$  개가 존재한다.

보조정리 3-1:  $r (2 \leq r \leq k)$  와  $i, j (1 \leq i, j \leq n)$ 가 정수이고  $ANet_{n-1,k-1}(i_k), ANet_{n-1,k-1}(j_k) (i \neq j)$ 일 때  $ANet_{n-1,k-1}(i_k), ANet_{n-1,k-1}(j_k)$ 를 연결하는 간선의 수는  $\frac{(n-2)!}{(n-k-1)!}$  개이고 간선 집합의 수는  $\frac{n(n-1)}{2}$  개이다.

증명) 부 순열 방사형 광 통신망을 연결하는 간선 그룹의 수는 그룹간에 완전 그래프를 형성하므로 총 간선 그룹 수는  $\frac{n(n-1)}{2}$  개이며, 모든 그룹간에 동일한 간선 수를 가지고 있으므로 순열 방사형 광 통신망의 총 간선 수를 부 순열 방사형 광 통신망의 총 간선 수에서 감산한 다음 그 값을 부 순열 방사형 광 통신망을 연결하는 간선들의 집합으로 나누면 된다.

$$\text{즉, } \frac{\frac{kn!}{2(n-k-1)!} - \frac{n(k-1)(n-1)!}{2(n-k-1)!}}{\frac{n(n-1)}{2}} = \frac{\frac{n!}{2(n-k-1)!}}{\frac{n(n-1)}{2}} = \frac{(n-2)!}{(n-k-1)!} \text{ 이다. } \blacksquare$$

정의 3-1:  $ANet_{n,k}$ 의 부 순열 방사형 광 통신망을 각각  $ANet_{n-1,k-1}(i_k), ANet_{n-1,k-1}(j_k) (1 \leq i, j \leq n)$ 이라고 하면  $R_{i,j} = \frac{(n-i)(n-i-1)}{2} + j - i$  은  $ANet_{n-1,k-1}(i_k)$ 과  $ANet_{n-1,k-1}(j_k)$ 을 연결하는 상위 레벨 연결 간선 집합의 순서로서 이를 **간선집합**이라고 한다.

하나의 간선 집합은  $\frac{(n-2)!}{(n-k-1)!}$  개의 간선을 가지고

있으며 그러한 간선 집합이 총  $\frac{n(n-1)}{2}$  개 존재한다.  $k$  개의 심볼들의 순열에 대한 관계  $\alpha$ 가 주어질 때 한 간선 집합내에 존재하는  $\frac{(n-2)!}{(n-k-1)!}$  개의 간선들의 순서를 관계  $\alpha$ 로써 정의할 수 있다. 관계  $\alpha$ 의 정의는 다음과 같다.

정의 3-2 :  $k$ 차원의 두노드  $a_1 \dots a_k, b_1 \dots b_k$ 가 있다고 하자.  $i (1 \leq i \leq k) > p$  일 때  $a_i = b_i$ 이고  $i=p$ 일 때  $a_i < b_i$ 를 만족하는  $p$ 가 존재하면  $a_1 \dots a_k \propto b_1 \dots b_k$ 이다.

이제 우리는 정의 3-1의 간선 집합의 순서와 정의 3-2의 한 간선 집합내의 간선 순서를 통해서  $i$ 차원 간선의 전체 순서를 정의 할 수 있다.

정의 3-3 :  $i$ 차원 간선을  $e_i$ 라할 때  $e_i$ 가 속해있는 간선 집합의 순서를  $R_{ij}$ 하고  $\chi(e_i)$ 를 한 간선 집합안에서의 순서라고 하면  $\alpha(e_i) = (R_{ij}-1) \times \frac{(n-2)!}{(n-k-1)!} + \chi(e_i)$ 인  $\alpha(e_i)$ 는 한  $i$ 차원 간선의 순서이다.

**3.2 임베딩 구조**

하나의 스타 커플러에서 이용할 수 있는 채널의 총 수를  $w$ 라하고 하나의 스타 커플러에 임베딩할 수 있는 최대 순열 방사형 광 통신망을  $ANet^w$  라할 때 순열 방사형 광 통신망을 다중 스타 커플러에 임베딩하는 방법은 다음과 같다.

단계 1. 임베딩하려고 하는 순열 방사형 광 통신망의 간선 수가 한 스타 커플러의 최대 채널 수보다 작다면 ( $\frac{kn!}{2(n-k-1)!} \leq w$ ) 모든 간선을 하나의 스타 커플러에 임베딩할 수 있다.

단계 2. 만약 순열 방사형 광 통신망의 간선 수가 한 스타 커플러의 채널 수보다 크다면 ( $ANet_{n,k} \geq ANet^w + 1$ ) 그 순열 방사형 광 통신망을 한 스타 커플러에 임베딩할 수 있는 크기만큼으로 작게 분할한다. 분할하는 방법은 순열 방사형 그래프의 계층적 성질을 이용하는데  $k$ 번째 위치에  $n$ 개의 값  $i (1 \leq i \leq n)$ 를 각각 고정 시킴으로써  $n$ 개의 부 순열 방사형 광 통신망  $ANet_{n-1,k-1}$ 을 구한다. 분할된  $n$ 개의  $ANet_{n-1,k-1}$ 은 각각 독립된 스타 커플러에 임베딩한다. 이때  $ANet_{n-1,k-1}$ 들이 상위  $ANet_{n,k}$ 을 생성하기 위해서는  $\frac{n!}{2(n-k-1)!}$  개의 간선이 존재한다. 이 간선들이 부 순

열 방사형 광 통신망을 상호 연결하므로 이 간선들을 임베딩하기 위해서 다음과 같은 방법을 사용한다.

- 2.1  $n$ 개  $ANet_{n-1,k-1}$ 은  $n$ 개의 독립된 스타 커플러에 반복적으로 임베딩한다.
- 2.2  $ANet_{n-1,k-1}$  들을 연결하는 간선은 이미 임베딩된 스타 커플러와는 다른 부가적인 스타 커플러에 할당한다. 간선 그룹  $i$ 에 있는 간선들은  $\lceil \frac{i}{w} \rceil$  번째의 부가적 스타 커플러에 할당된다. 이때 부가적인 스타 커플러를  $1, 2, \dots, \lceil \frac{n!}{w(n-k-1)!} \rceil$  으로 번호화 한다.

단계 3. 만약 분할된 하나의  $ANet_{n-1,k-1}$ 가 하나의 스타 커플러에 임베딩되지 않으면 하나의 스타 커플러에 임베딩될때까지 ( $ANet_{n-1,k-1} \leq ANet^w$ ) 반복적으로 단계 2를 수행한다.

그림 2는  $ANet_{n,k}$ 를 다중 스타에 임베딩하는 논리적 모형을 도식화하였다.

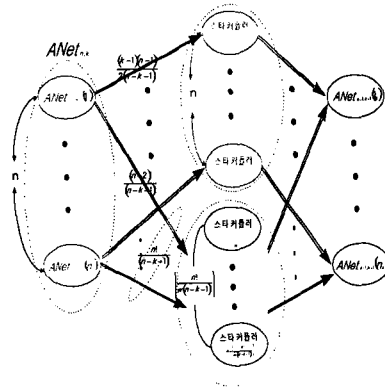


그림 2  $ANet_{n,k}$ 의 다중 스타 임베딩

$n$ 개의  $ANet_{n-1,k-1}(i_k) (1 \leq i \leq n)$ 에 대해서 먼저  $ANet_{n-1,k-1}(1_k)$ 의  $\frac{(k-1)(n-1)!}{2(n-k-1)!}$  개의 내부 간선은 독립적인 스타 커플러  $C_0$ 에 모두 임베딩 한다. 다음으로  $ANet_{n-1,k-1}(2_k)$ 를 스타 커플러  $C_1$ 에 같은 방법으로 임베딩 한다. 결국,  $ANet_{n-1,k-1}(n_k)$ 을 스타 커플러  $C_{n-1}$ 에 임베딩하면 모든 내부 간선이 할당되게 되는 것이다. 내부 간선 할당이 완료되면 다음으로 외부간선 집합을 순서에 따라  $\frac{n!}{w(n-k-1)!}$  번째 부가적인 스타 커플러에 임베딩한다.

보조 정리 3-2 :  $ANet_{n,k}$  을 임베딩하기 위해서 필요한 스타 커플러의 수를  $C_m$ , 한 스타 커플러의 채널 수를  $w$ ,  $N = \frac{n!}{(n-k)!}$  이라고 할 때,  $C_m = \theta(\frac{(n-1)N}{w})$  이다.

증명) 재귀적 알고리즘에 의해  $C_m = n C_{m-1} + \lceil \frac{n!}{w(n-k-1)!} \rceil$  이 된다. 이 재귀 방정식을 풀면  $C_m = \theta(\frac{(n-1)N}{w})$  이다. ■

3.3 채널 할당 알고리즘

순열 방사형 광 통신망의 계층적 확장성에 의해서 각 노드의  $k(n-k)$ 개의 간선 중에서 그룹내의 노드를 연결하는 간선들을 각각 독립된 스타 커플러에 할당하고 그룹간을 연결하는 외부 간선들은 부가적 스타 커플러에 할당한다. 그림 3는 송신 채널 할당의 예를 보이고 있으며, 그림 4은 수신 채널 할당의 예를 보이고 있다. 그림 3과 그림 4의 각 노드에는 (coupler, channel)의 표시가 사용되고 있는데 coupler는 각 노드에 할당된 커플러를 의미하며, channel은 할당된 커플러에서 사용되는 채널을 의미한다. (알고리즘 3.1)은 다중 스타 커플러를 이용하여 채널을 할당하는 일반적인 알고리즘을 보이고 있다. (알고리즘 3.1)에서 함수  $inter\_pair(intragroup\_node)$ 는 한 그룹내의 모든 노드 쌍들의 집합을 찾는 함수이며,  $internal\_link(intragroup\_node, j)$ 는 그룹내 임의의 한 노드인  $intragroup\_node$ 에서 그룹내의 또다른 노드  $j$ 를 연결하는 간선을 의미한다. 그리고 (알고리즘 3.1)의 결과는 송수신 채널 할당 결과를 가지고 있는 2차원 배열  $send\_channel[]$ ,  $receive\_channel[]$ 이며, 시간 복잡도는  $O(N)$ 이다.

(알고리즘 3.1) 다중 스타를 이용한 채널 할당 알고리즘.

입력 :  $n, k$  and  $w$ .

출력 : 채널 할당 배열  $send\_channel[]$ ,  $receive\_channel[]$ .

```

begin
  for node_group := 1 to n do
    begin
      channel := 0; coupler := 0;
      for intragroup_node := 1 to  $\frac{(n-1)!}{(n-k)!}$  do
        begin
          internal_link(intragroup_node, j) :=
            inter_pair(intragroup_node);
          send_channel[intragroup_node, internal_link] := (coupler, channel);
          receive_channel[intragroup_node, internal_link] :=
            (coupler, channel);
          channel := channel + 1;
        end;
      coupler := coupler + 1;
    end;
end;

```

```

for total_external_rank := 1 to  $\frac{n!}{(n-k-1)!}$  do
  begin
    p := 2; external_link(i, j) := exter_pair(total_external_rank);
    while (p > 0) do
      begin
        send_channel[i, j] := (coupler, channel);
        receive_channel[i, j] := (coupler, channel);
        If channel = w-1
          begin
            channel := 0;
            coupler := coupler + 1;
          end;
        channel := channel + 1;
        temp := i; i := j; j := i; p := p-1;
      end;
    end;
  end;
end;

```

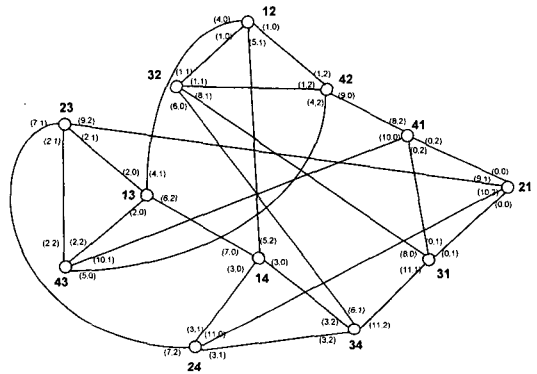


그림 3 스타 커플러당 3개의 채널을 갖는  $ANet_{4,2}$ 의 송신 채널 할당

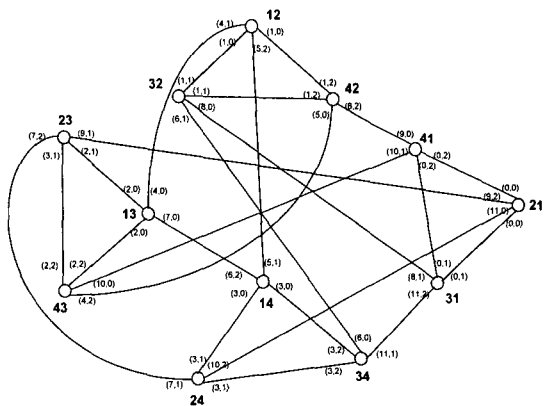


그림 4 스타 커플러당 3개의 채널을 갖는  $ANet_{4,2}$ 의 수신 채널 할당

#### 4. 확장성

확장성은 통신망에서의 중요한 척도중의 하나이다. 이것은 통신망에서 노드들을 추가하고 삭제하는 것을 허락한다. 우리는 통신망의 확장성의 척도로 다음을 정의한다.

$$\text{통신망의 확장성} = \frac{\Delta N}{N} = \frac{\text{추가된 노드들의 총 수}}{\text{변화된 노드들의 총 수}}$$

위의 확장성 척도는 작으면 작을수록 통신망의 높은 확장성을 갖는다. 가장 이상적이고 바람직한 값은  $\frac{1}{N}$ 으로 한 번에 하나의 노드를 추가하거나 삭제할 수 있다는 것이다.

순열 방사형 광 통신망에서  $ANet_{n,k}$ 로부터  $ANet_{n+1,k+1}$ 으로 확장하기 위해서 추가되는 총 노드 수는  $\frac{(n+1)!}{(n-k)!} - \frac{n!}{(n-k)!} = n \frac{n!}{(n-k)!}$  이므로 통신망의 확장성은  $\frac{\Delta N}{N} = \frac{n \frac{n!}{(n-k)!}}{\frac{n!}{(n-k)!}} = n$ 이 된다. 다시 말하면 순열 방사형

광 통신망의 확장성은 좋지 않다. 이러한 단점을 보완하기 위해서 다중 스타에 순열 방사형 그룹을 임베딩하는 방법을 통해서 한 번에 추가되는 노드 수를 최소화하는 과정을 보게 될 것이다.

##### 4.1 다중 스타에 순열 방사형 그룹 임베딩

순열 방사형 그룹  $m(1 \leq m < (n+1)) \times ANet_{n,k}$  은  $m$ 개의  $ANet_{n,k}$ 로 구성된다.  $ANet_{n,k}(i, k+1) (n-m+1 \leq i \leq n)$ 를 순열 방사형 그룹에 속하는 하나의 순열 방사형 광 통신망  $ANet_{n,k}$ 라고 하자. 이때  $ANet_{n,k}(i, k+1)$ 의 모든 노드들은  $(k+1)$ 번째에 심볼  $i$ 를 갖는다. 그러면  $ANet_{n,k}$ 들은  $ANet_{n+1,k+1}$ 에서 처럼  $k+1$ 차원 간선에 의해서 상호 연결된다. 이 임베딩 구조의 기본 개념은 각각의  $ANet_{n,k}$ 를 앞에서 설명한 알고리즘에 의해서 스타 커플러에 임베딩시키고  $ANet_{n,k}$ 들을 연결하는 간선은 또다른 독립된 스타 커플러에 임베딩시키는 것이다. 이때 간선의 수는  $\frac{m(m-1)(n-1)!}{2(n-k-1)!}$  개다. 순열 방사형 그룹  $m \times ANet_{n,k}$ 을 다중 스타에 임베딩하는 알고리즘은 다음과 같다.

단계 1 :  $i = n+1$ 이라고 하면  $ANet_{n,k}(i, k+1)$ 을 앞절에서 설명한 방법을 사용하여 스타 커플러에 반복적으로 임베딩한다.

단계 2 :  $i = i-1$ 이라고 하면  $ANet_{n,k}(i, k+1)$ 을 각각

독립적으로 스타 커플러에 임베딩한다.  $ANet_{n,k}(i, k+1)$ 와  $ANet_{n,k}(j, k+1) (i < j \leq n+1)$ 을 연결하는 간선들은 다음과 같이 연결한다.

2.1  $ANet_{n,k}(i, k+1)$ 과  $ANet_{n,k}(j, k+1)$ 을 연결하는 간선을  $e$ 라하고  $ANet_{n+1,k+1}$ 에서의 전체 순서를  $r(e)$ 라고 하면  $\lceil \frac{r(e)}{w} \rceil$  번째의 부가적 스타 커플러에 이 간선을 임베딩한다.

단계 3 :  $i = n-m+2$ 일때까지 반복 수행한다.

(알고리즘 4.1)은 순열 방사형 그룹에 채널을 할당하는 일반 알고리즘이다. 여기에서 rank()는 외부 간선들의 순서를 결정하는 함수이고 rank\_order[]와 total\_rank\_order[]는 rank()에 의해 결정된 순서에 따라 정렬되어 있는 1차원 배열이며 배열 각각은 외부 간선 쌍의 내용을 갖고 있다.

(알고리즘 4.1) 순열 방사형 그룹에 대한 채널 할당 알고리즘.

입력 :  $n, k, m$  and  $w$ .

출력 : 채널 할당 배열  $send\_channel[]$ ,  $receive\_channel[]$ .

```

begin
  s := n+1;
  for sub_cluster := 1 to m do
    begin
      assign channels to sub_arrangement(s, k+1) using section
      2.1.3 algorithm;
      s := s-1;
    end;
  i := n;
  while ( i >= n-m+2 ) do
    begin
      for t := i+1 to n+1 do
        begin
          rank_order[] := rank(sub_arrangement(i,k+1),
                               sub_arrangement(t,k+1));
        end;
        total_rank_order[] := total_rank_order[] + rank_order[];
        I := I-1;
      end;
      index := 0;
      while ( total_rank_order[] > 0 ) do
        begin
          p := 2;
          external_link(i, j) := total_rank_order[index];
          while ( p > 0 ) do
            begin
              send_channel[i, j] := (coupler, channel);
              receive_channel[i, j] := (coupler, channel);
              if channel = w-1 begin
                channel := 0; coupler := coupler +1;
              end;
              channel := channel + 1; temp := i; i := j; j :=
                i; p := p-1;
            end;
          end;
        end;
      end;
    end;
  end;
end;

```

```

    index := index + 1;
end;
end.

```

보조 정리 4-1 : 순열 방사형 그룹  $m \times ANet_{n,k}$  을 임베딩시키기 위해 요구되는 스타 커플러의 수를  $SG_N$  이라 하고 순열 방사형 그룹의 크기는  $N = m \times \frac{n!}{(n-k)!}$  이라고 하자.  $w$  가 하나의 스타 커플러에서 이용될 수 있는 채널 수를 표시한다고 하면 요구 스타 커플러의 수는  $SG_N = \Theta\left(\frac{n \times N}{w}\right)$  이다.

증명) 하나의  $ANet_{n,k}$  를 임베딩시키기 위해 필요한 스타 커플러 수를  $C_n$  이라 하자. 임베딩 알고리즘에 의해  $ANet_{n,k}$  간의 상호 연결을 위해 요구되는 스타 커플러 수는  $\lceil \frac{m(m-1)(n-1)!}{w(n-k-1)!} \rceil$  이다. 총 요구 스타 커플러 수는  $SG_N = m \cdot C_n + \lceil \frac{m(m-1)(n-1)!}{w(n-k-1)!} \rceil$  이고, 이것을 풀면  $SG_N = \Theta\left(\frac{n \times N}{w}\right)$  이다. ■

보조 정리 4-2 :  $ANet_{n,k}$  의 직경을  $D_n$  이라고 하고 순열 방사형 그룹  $m \times ANet_{n,k}$  의 직경을  $D_{SG}$  라 하면,  $D_{SG} = D_n + 2$  가 된다.

증명) 순열 방사형 그룹  $m \times ANet_{n,k}$  에 있는 두 노드  $s (s \in ANet_{n,k}(i, k+1))$  와  $d (d \in ANet_{n,k}(j, k+1))$  를 고려해 보자.  $s$  의 레이블을  $p_1 p_2 \dots p_{ki}$  이라고 하면 2.2절의 경로 배정 알고리즘에 의해서  $d$  에 도달할 때까지  $s$  를 계속해서 수정한다.

경우 1 :  $i = j$  인 경우는 노드  $s$  와  $d$  가 동일한 통신망에 존재하는 것으로  $s$  에서  $d$  까지의 경로 배정은 순열 방사형 광 통신망의 경로 배정을 따른다. 이 때 총 홉수는 최대  $D_n$  이다.

경우 2 :  $i \neq j$  인 경우는 노드  $s$  와  $d$  가 다른 통신망에 존재한다. 만약  $p_i = j$  이라면  $s$  의 레이블은  $j p_2 \dots p_{ki}$  이다.  $j$  를  $p_i$  로 대체함으로써  $s$  를 수정한다. 이때  $s$  의 레이블은  $p_1 p_2 \dots p_{ki}$  이며,  $s' \in ANet_{n,k}(i, k+1)$  이다. 다음으로  $s'$  의 심볼  $i$  를  $j$  로 대체하면 레이블은  $p_1 p_2 \dots p_{kj}$  이며,  $s'' \in ANet_{n,k}(j, k+1)$  가 된다. 따라서  $s''$  에서  $d$  까지의 경로 배정은 경우 1이 되므로 노드  $s$  에서  $d$  까지의 최대 거리는  $D_n + 2$  가 된다. 1에서  $k$  사이의 임의의 위치에서 동일하게 적용된다. ■

예를들면 근원지 노드가 145이고 목적지 노드가 415라고 하자. 이 두 개의 노드 레이블의 3번째 값이 5로써 동일하므로 같은 부 통신망에 존재하게 된다. 이것은 앞에서 설명한 경로 배정 방법을 사용하여 결정하면된다. 즉  $145 \rightarrow 135 \rightarrow 435 \rightarrow 415$  이다. 다른 예로써 근원지 노드가 435이고 목적지 노드가 534라고 한다면 이 두 개의 노드 레이블의 마지막 값이 각각 5,4로써 다르기 때문에 두 노드는 다른 부 통신망에 존재한다는 것을 의미한다. 먼저 435에서 4가 위치한 값을 다른 값으로 대체한다(435  $\rightarrow$  135). 다음으로 목적지 노드가 있는 부 통신망으로 이동하기 위해서 마지막 위치 값은 4로 대체한다(135  $\rightarrow$  134). 이제 134 노드는 목적지 노드가 있는 부 통신망이므로 내부 경로 배정을 통해서 목적지에 도달할 수 있다.

보조 정리 4-3 :  $ANet_{n,k}$  의 노드 수를  $N$  이라 하고 순열 방사형 그룹  $m \times ANet_{n,k}$  의 노드 수를  $N_{SG}$  라고할때,  $m \times ANet_{n,k}$  에 대한 확장정도는  $\frac{1}{m}$  이다.

증명)  $N_{SG}$  개의 노드 수를 갖는 순열 방사형 그룹  $m \times ANet_{n,k}$  으로 확장시키면 추가되는 총 노드 수는  $N$  이고 확장 하기 전에 노드 수가  $N_{SG} = m \times N (1 \leq m \leq n+1)$  이므로 확장성 척도에 대한 정의에 의해서  $\frac{N}{N_{SG}} = \frac{N}{m \times N} = \frac{1}{m}$  이다. ■

이러한 알고리즘에 의해서 만들어지는 임베딩의 특성은 첫째, 순열 방사형 광 통신망의 각 간선이 직접적으로 하나의 채널에 의해 연결되므로 최소 팽창성을 갖는다. 둘째, 스타 커플러의 오류시 임의의 한 노드와 연결된 간선이 다른 스타 커플러에 나뉘어져 있으므로 사용자 스테이션의 고립 수를 줄일 수 있다. 셋째, 간단한 임베딩 절차를 가지고 있다.

### 5. 성능 평가

본 절에서는 순열 방사형 광 통신망과 shuffleNet, k-차원 torus, R-ary Hypercube와 같은 다른 통신망들과 성능을 비교할 것이다. [4]의 연구와 유사하게 고려되는 성능 평가 요소는 다음과 같다.

- $\bar{H}$  : 평균 홉 수
- $\eta$  : 채널 효율성
- $W$  : 총 채널의 수
- $C$  : 최대 통신망 성능

트래픽 부하가 정규 분포하고 가정할때 이들은 다음과 같이 정의 된다.

$$\eta = \frac{1}{H}$$

$$C = \eta W$$

$N = \frac{n!}{(n-k)!}$  인 순열 방사형 광 통신망의 한 주어진 근원지 노드에서 통신망의 각 목적지 노드까지 최소 홉 거리는 근원지 노드를 근 노드로 하는 방향성 신장 트리로 표현 할 수 있다.  $ANet_{n,k}$  의 한 노드에 의해 생성된 패킷을 전송하기 위한 신장 트리는 다음과 같이 얻을 수 있다.

홉 수	한 노드로부터 h 홉에 있는 사용자의 수
1	$(n-k)$
2	$(n-k)^2$
.	.
.	.
k-1	$(n-k)^{k-1}$
k	$(n-k)^k - 1$
k+1	$(n-k)^k - (n-k)$
k+2	$(n-k)^k - (n-k)^2$
.	.
.	.
2k-1	$(n-k)^k - (n-k)^{k-1}$

그러므로 한 근원지 노드로부터 임의로 선택된 목적지 노드까지의 평균 홉 수는

$$\bar{H} = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^H i \cdot (i \text{ 홉 거리에 있는 노드의 수})$$

이므로 위의 결과를 대입하면

$$\bar{H}_n = \frac{1}{\left(\frac{n!}{(n-k)!}\right) - 1} \sum_{i=1}^{2k-1} i \cdot (n-k)^i$$

$$= \frac{k(n-k)^k(n-k-1)(3k-1) - 2k((n-k)^k - 1)}{2(n-k-1)(k(n-k)^k - 1)} \text{ 이고}$$

최대 홉 수는  $D_A = \lfloor \frac{3}{2} k \rfloor$  이다.

[표 1]은 기존 정규 다중 홉 광 통신망과 순열 방사형 광 통신망을 비교한 것이다. 성능평가 결과 k-차원 torus는 전체 통신망에서 가장 좋지 않은 성능을 보이고 있으며 특히 직경이 상대적으로 매우 크게 증가한다. r-ary Hypercube는 순열 방사형 광 통신망에 비해서

전체적으로 낮은 성능을 보이고 있다. 노드 수에 대한 직경과 간선 수가 급격히 증가 할 뿐 아니라 이분율이 매우 낮은 단점을 가지고 있다. shuffleNet은 순열 방사형 광 통신망과 유사한 성능을 보였다. 그러나 그림 5와 6의 노드 수의 증가에 따른 총 채널수와 최대 통신망 성능에 관한 그래프를 통해서 shuffleNet이 순열 방사형 광 통신망과 동일수준의 성능을 보이기 위해서 많은 채널을 사용하고 있으며, 이러한 많은 채널의 사용으로 인하여 전체 통신망의 성능 또한 매우 좋지 않게 나타나고있다. 순열 방사형 광 통신망은 shuffleNet과 동일한 노드수를 가지고 있으면서도 적은 채널을 사용하고 대칭적 전송거리를 갖는다. 다중 스타 커플러를 사용하는 광 통신망에서 파장 재사용성은 스타 커플러의 수와 스타 커플러당 파장 수 사이에 절충이 존재한다. 스타 커플러의 수를 작게하면 단일 스타 커플러당 파장의 수가 증가하고 스타 커플러의 파장 수를 제한하면 전체 스타 커플러의 수가 증가하므로 요구하는 재구성 자유도에 따라 두 요소를 적절히 조정하는 것이 중요하다.

표 1 기존 정규 다중 홉 통신망과의 특성비교

특 성	(p,k) ShuffleNet	(Δ,D) de Bruijn	n-ary Hypercube	MSN (2D torus)	순열 방사형 광 통신망
노드당 송신기의 수 (수신기의 수) d	p	Δ	$(r-1) \log_r N$	2	k(n-k)
노드의 수 N	$kp^k$	$\Delta^D$	$r^d$	$N_1 \times N_2$	$\frac{n!}{(n-k)!}$
평균 홉 거리	$\log_d^N$	$\log_d^N$	$\log_r^N$	$\sqrt{N}$	$\log_d^N$
직경, D	2k-1	$\log_d^N$	$\log_r^N$	$\sqrt{N}$	$\lfloor \frac{3}{2} k \rfloor$
확장성	poor	poor	poor	good	average

## 6. 결론

WDM은 현재 또는 미래의 초고속 광 통신을 실현하는데 가장 적합하다. WDM은 단일 홉과 다중 홉 접근 방식이 있는데 전송한 것처럼 단일 홉의 단점 때문에 다중 홉 방법이 좀 더 현실적이다. 다중 홉 통신망에서 사용자는 소수의 송/수신기를 가지고 있으며 이들 각각은 사전에 정의된 파장에 따라 신호를 송수신한다. 일반적으로 파장 할당은 논리 토폴로지를 기반으로 하는데



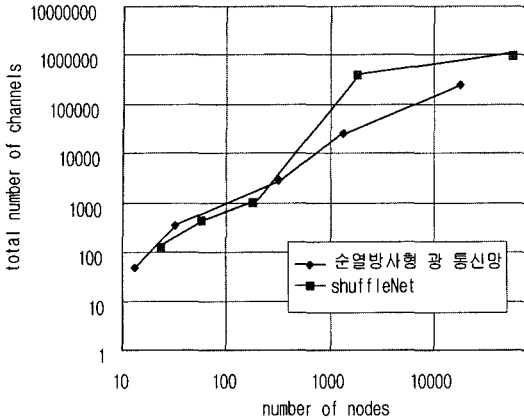


그림 5 총 채널 수 대 노드 수

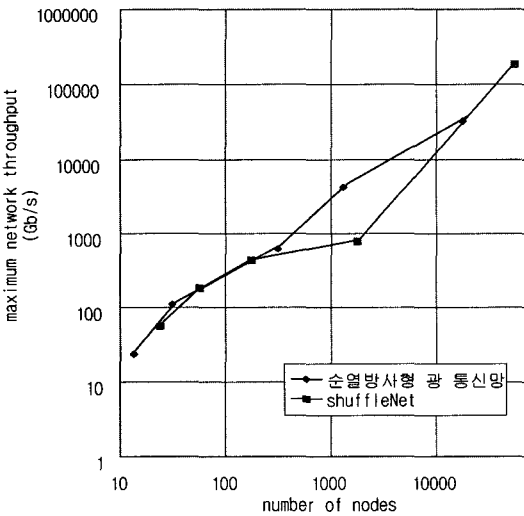


그림 6 최대 통신망 성능 대 노드 수

ShuffleNet, de Bruijn, Hypercube, MSN, CayleyNet 등이 있다. 효율적인 논리 토폴로지는 가능한 많은 사용자들이 적은 홉 수를 통해서 상호 연결되고 적은 파장 채널을 통해서 상호 메시지를 전달 할 수 있다는 것을 의미 한다. ShuffleNet과 de Bruijn의 단점은 두 노드 사이의 비 대칭적 전송거리를 갖는다는 것이며 또한 다른 논리 토폴로지에 비해서 상대적으로 많은 파장 채널이 요구된다. Torus는 대칭적 전송거리와 망 크기에 대한 융통성이 자유롭지만 메시지를 전송하기 위해서 상대적으로 긴 경로 길이를 요구하므로 대규모 통신망에

는 적합하지 않다. Hypercube는 대칭적 전송거리와 로그 함수로 노드 수가 증가하지만 노드 수에 대해서 급격히 간선의 수가 증가한다. CayleyNet은 대칭적 전송 거리를 갖지만 간선이 4인 제한적 경우에 대해서만 순열 방사형 광 통신망과 유사한 성능을 보이며 경로 배정 알고리즘이 매우 복잡하다. 따라서 본 논문에서는 논리 토폴로지로서 순열 방사형 그래프를 이용한 순열 방사형 광 통신망을 제안하였다. 순열 방사형 광 통신망은 대칭적 전송거리 뿐만 아니라 다음과 같은 여러 성질을 가지고 있다. 첫째, 순열 방사형 그래프의 계층적 성질을 이용하여 순열 방사형 광 통신망을 다중 스타 커플러에 임베딩하는 새로운 방법을 제시하였다. 둘째, 하드웨어 비용을 고려할 때 확장성은 매우 중요한 척도이므로 순열 방사형 광 통신망을 그룹화함으로써 확장 정도를 1/m로 줄일 수 있음을 보였다. 지금까지 살펴본 것 처럼 모든 응용 분야에 알맞는 완전한 논리 토폴로지는 존재하지 않을뿐만아니라 효과적인 토폴로지는 토폴로지가 사용되는 응용분야와 관련이 있으며 실질적인 제한 사항들에 의존한다. 따라서 본 논문에서 제안한 순열 방사형 광 통신망은 대칭적 전송거리를 가지며 제한된 파장으로 많은 사용자의 수용을 요구하는 응용 분야에 사용될 수 있는 대안 토폴로지이다.

### 참고 문헌

- [1] C. A. Brackett, "Dense Wavelength Division Multiplexing Networks : Principles and Applications," *IEEE J. Select. Areas in Commun.*, vol. 8, no. 6, pp. 948-964, 1990.
- [2] B. Mukherejee, "WDM-Based Local Lightwave Networks-Part 1: Single-Hop Systems," *IEEE Network Mag.*, May, pp. 12-26, 1992.
- [3] B. Mukherejee, "WDM-Base Local Lightwave Networks-Part II: Multi-Hop Systems," *IEEE Network Mag.*, July, pp. 20-32, 1992.
- [4] M. G. Hluchyj and M. J. Karol, "ShuffleNet : An Application of Generalized Perfect Shuffles to Multihop Lightwave Networks," *IEEE INFOCOM '88*, pp. 379-390, 1988.
- [5] K. Sivarajan and R.Ramaswami, "Multihop Lightwave Networks based on De Bruijn graphs," *IEEE INFOCOM '91*, pp. 1001- 1011, April, 1991.
- [6] L. N. Bhuyan, D. P. Agrawal, "Generalized Hypercube and Hyperbus Structures for a Computer Network," *IEEE Trans. Comput.*, vol. c-33, pp. 323-333, April, 1984.
- [7] N.F. Maxemchuk, "Regular Mesh Topologies in Local and Metropolitan Area Networks," *AT&T Technical Journal*, vol. 64, pp. 1659-1686, Sep., 1985.

- [8] K. W. Tang, "CayleyNet : A Multihop WDM-Based Lightwave Network," *IEEE INFOCOM '94*, pp. 1260-1267, 1994.
- [9] K. Day, A. Tripathi , "Arrangement Graphs : A Class of Generalized Star Graphs," *Inform. Processing Lett.*, no. 42, pp. 235-241, 1992.



김 원

1988년 2월 숭실대학교 전자계산학과 학사. 1993년 2월 숭실대학교 대학원 전자계산학과 석사. 1997년 8월 숭실대학교 대학원 전자계산학과 박사. 1995년 3월 ~ 현재 전주기전여자대학 컴퓨터과 조교수. 관심분야는 광 통신망, 멀티미디어

통신



전 문 석

1974년 3월 ~ 1980년 2월 숭실대학교 전산과 학사 졸업. 1983년 9월 ~ 1986년 6월 University of Maryland, Dept. of Computer Science 석사 졸업. 1986년 9월 ~ 1989년 1월 University of Maryland, Dept. of Computer Science 박사 졸업. 1989년 3월 ~ 1990년 2월 Morgan State University 전산과 조교수. 1990년 3월 ~ 1991년 2월 PSL 연구소 책임연구원 미국. 1991년 3월 ~ 현재 숭실대학교 정보과학대학 부교수. 관심분야는 광 통신망, 정보 보호, 암호학, 컴퓨터 네트워크 등