

논문 2013-50-10-9

# 파장 라우팅 광학 네트워크-온-칩에서의 최소 개수 파장 할당 기법

( A Minimum Wavelength Assignment Technique  
for Wavelength-routed Optical Network-on-Chip )

김 영 석\*, 이 재 훈\*, 최 적\*, 한 태 희\*\*

( Youngseok Kim, Jae Hun Lee, Di Cui, and Tae Hee Han<sup>©</sup> )

## 요 약

실리콘 포토닉스 기반의 광학 네트워크-온-칩(Optical NoC, ONoC)은 차세대 엑사스케일 컴퓨팅(Exascale computing)을 위한 유망 아키텍처 기술 중 하나이다. 최근 들어 활발해지고 있는 ONoC의 연구들은 파장 분할 다중화(Wavelength Division Multiplexing, WDM)를 이용하여 대역폭을 더욱 향상시키고 광신호의 경로 충돌을 방지하는데 초점을 두고 있다. 하지만 기존 ONoC 연구에서는 중앙 집중형 라우터 구조 위주로 Processing Element(PE)의 수가 증가함에 따라 WDM을 위해 사용되는 파장 수가 선형적으로 증가한다. 이러한 파장 수의 증가는 다중 파장을 위한 광원 및 광학 스위치 등 광학 장치를 구성하기 위한 비용을 증가시키고 광신호의 상호 간섭에 의한 감쇄 효과 등으로 ONoC의 확장성을 제한한다.

본 논문에서는 WDM 기반 2D-mesh 구조의 ONoC를 위한 분산형 광학 라우팅 아키텍처를 제안하고 커뮤니케이션의 연결 정도에 따라 필요한 파장 수를 최소화하는 방법을 제시하였다. 기존 중앙 집중형 라우팅 아키텍처와 비교하여 8x8 네트워크에서 평균 56% 파장 수와, 21%의 광학 스위치 수를 감소시켰다.

## Abstract

An Optical Network-on-Chip(ONoC) based on silicon photonics is one of promising technology for next generation exascale computing architectures. Recent active researches on ONoC focus on improving bandwidth further and avoiding path collisions by using wavelength division multiplexing (WDM). However, the number of wavelengths used for the WDM increases linearly as the number of Processing Element (PE) increases in existing ONoCs which adopt centralized routing architecture. The problem will also arises growing cost of optical devices such as light switches and light sources and limits the scalability of ONoC due to the signal loss caused by interference of distinct light sources.

In this paper, we proposes a distributed routing architecture for ONoC which is based on 2D-mesh structure using WDM technique and present a method that minimize the required number of wavelengths exploiting the connectivity of communication. In comparison with existing centralized routing architectures, results show reduction by 56% of the number of wavelengths and 21% of the number of optical switches in 8x8 networks.

**Keywords** : Optical NoC, WDM, wavelength-routing, wavelength assignment

\* 학생회원, \*\* 평생회원, 성균관대학교 정보통신대학  
(College of Information & Communication  
Engineering, Sungkyunkwan University)

© Corresponding Author(E-mail: than@skku.edu)

※ 본 연구는 미래창조과학부 및 정보통신산업진흥원  
의 대학 IT연구센터 육성지원 사업의 연구결과로  
수행되었음 (NIPA-2013-H0301-13-1011)

접수일자: 2013년7월31일, 수정완료일: 2013년9월30일

## I. 서 론

21세기 들어 반도체 제조비용 증가와 전력 소모 한계  
로 인해 고성능 컴퓨팅의 새로운 패러다임으로 다중 프  
로세서 시스템-온-칩(MPSoC)이 등장하였다. MPSoC에

서는 단일프로세서의 성능뿐만 아니라 각 프로세서간의 커뮤니케이션 또한 전체 시스템 성능에 지대한 영향을 끼치게 되었다. SoC의 연결 구조는 공유 버스 방식을 벗어나 point-to-point 스위칭 방식의 네트워크-온-칩(Network-on-Chip, NoC)로 진화되었지만, 기존 금속배선 기반의 전기적 상호 연결 구조(Electrical Interconnect, EI)로 이루어진 NoC는 대역폭, 전력 소모, 지연 시간 등의 면에서 물리적 한계에 당면하고 있다. 최근, 실리콘 포토닉스(silicon photonics) 기술을 적용한 광학 네트워크-온-칩(Optical NoC, ONoC)은 기존 EI에서 발생하는 문제점을 극복하고자하는 시도이며, EI 기반 NoC에 비해 증가하는 제조비용과 수율 저하는 향후 극복되어야 할 문제이다.

현존하는 ONoC는 구조 및 설계방식에 따라 두 가지로 분류된다. 첫째는 동적으로 발생하는 커뮤니케이션에 대하여 전기적 신호에 의해 광학 경로를 설정하고 광학 네트워크를 통해 데이터를 전송하는 구조의 하이브리드 광학 네트워크-온-칩(Hybrid ONoC, HONoC)이다<sup>[1-3]</sup>. 둘째는 고정된 커뮤니케이션 패턴을 설계 단계에서 고려하여 각 커뮤니케이션의 출발지(source)-목적지(destination) 쌍에 따라 서로 다른 파장을 할당하여 라우팅하는 파장 라우팅 기반 광학 네트워크-온-칩(Wavelength-routed ONoC, WONoC)이다<sup>[4-10]</sup>.

WONoC는 각 커뮤니케이션마다 서로 다른 파장을 사용하여 고유의 경로에 따라 데이터를 전송하기 때문에 경로 충돌에 의한 지연시간이 없어 극대화된 스루풋(throughput)을 가질 수 있다. 하지만 전통적인 WONoC는 PE의 수( $N$ )가 증가함에 따라  $O(N)$ 의 파장을 사용하고 광학스위치인 마이크로-링 공명기(micro-ring resonator, MR)는  $O(N^2)$ 의 개수를 필요로 한다. 이러한 파장 및 MR 수의 증가는 다중 파장을 발생시키는 광원과 각 파장의 제어를 위한 광학 장치의 비용을 증가시킨다. 또한 단일 도파관이 수용할 수 있는 파장 수의 한계에 쉽게 다다르게 하고<sup>[11]</sup> 광파의 간섭현상이나 광신호의 감쇄에 의해 비트-에러율(bit error rate, BER)을 증가시켜 WONoC의 성능을 저하시키는 요인이 된다<sup>[12]</sup>.

한편, 그동안의 WONoC는 각 출발지-목적지 쌍에 따라 다른 파장을 사용하여 데이터를 전송함으로써 높은 스루풋을 보장할 수 있어 전통적 NoC의 분산형 라우터(distributed router)의 구조를 취하지 않아도 되었

고, 이에 따라 WONoC의 시초가 된  $\lambda$ -라우터부터 중앙 집중형 라우팅 구조 위주의 연구가 계속되었다<sup>[4-6]</sup>. 하지만 이러한 중앙 집중형 라우팅 구조의 WONoC는 스루풋 뿐만 아니라 확장성의 한계가 존재하여 분산 라우팅 아키텍처로의 전환이 요구된다.

따라서 본 논문에서는 WONoC를 위한 분산형 라우터 구조를 제안하고, PE 간의 연결 관계를 고려하여 최소한의 파장 수로 광학 네트워크를 구성할 수 있는 방법을 제시하고자 한다. 분산형 라우터는 NoC의 대표적 토폴로지인 2D-mesh를 기반으로 하여 다중 파장을 라우팅할 수 있도록 설계되었고, 최소한의 파장 수를 찾기 위한 파장 할당의 문제는 이진 정수 선형 계획법(binary integer linear programming)으로 표현하여 최적해를 찾는다.

본 논문의 II장에서는 WONoC와 관련된 기존 연구들을 소개한다. III장은 2D-mesh 기반의 WONoC를 위한 분산형 라우터를 제안하고, 이진 정수 선형 계획법으로 기술한 최소 개수 파장 할당 기법은 IV장에서 설명한다. V장에서 제안하는 방법의 비교분석 결과를 보이고, 마지막으로 VI장에서는 결론을 정리한다.

## II. 관련 연구

WONoC에서 최초로 고려된 중앙 집중형 라우터는  $\lambda$ -라우터<sup>[4]</sup>이다.  $\lambda$ -라우터는  $N$ 개의 PE에 대하여  $N$ 개의 서로 다른 파장을 사용하고  $N(N-1)$ 개의 MR을 사용하여 라우터를 구성한다. 그러나 모든 PE가 상호 연결될 필요가 없을 경우  $N$ 개의 파장이 필요하지 않기 때문에, Ian et al.은 PE의 연결정도에 따라  $\lambda$ -라우터를 최적화 하는 방법을 제안하였다<sup>[5]</sup>. 그러나 [5]의 방법은 중앙 집중형 라우터의 구조적 특성 때문에 연결정도의 증가에 따른 파장 수 증가가 급격하여 실질적인 어플리케이션<sup>[13-15]</sup>의 상황에서도 감소시킬 수 있는 파장 수가 크지 않은 단점이 존재한다. Tan et al.은 각 PE간의 연결 관계에 따라 WONoC 라우터를 설계하기 위한 GWOR 기법을 제안하였다<sup>[6]</sup>. 하지만 여전히 [6]에서도 PE의 수에 비례한  $(N-1)$ 개의 파장을 사용하였고 이는 도파관 및 광학장치의 비용과 광신호 감쇄를 증가시킨다.

WONoC를 위한 분산형 네트워크의 연구로 Luying et al.은 2D-mesh 구조를 도입하였지만 이는 다중 도

파관을 사용한 것으로 단일 도파관을 사용하는 구조에 비해 도파관에 의한 면적의 오버헤드가 크다<sup>[7]</sup>. 2D-mesh 구조 외에는 클러스터 기반의 NoC를 광학 링-버스로 연결한 구조와<sup>[8]</sup> 링 토폴로지를 계층적으로 연결한 구조<sup>[9]</sup>, fat-tree<sup>[10]</sup> 구조 등이 제안되었다. 하지만 모두  $N$  개의 PE에 대하여  $N$  개의 파장을 사용하는 구조들로 파장 수 최소화에 대한 연구는 부족하였다.

본 논문에서는 2D-mesh 구조를 기반으로 한 분산형 라우터 구조를 제안하고, 각 PE의 커뮤니케이션 연결 정도를 고려하여 최소한의 파장 수로 WONoC를 구성할 수 있는 설계 방법을 제안한다.

### III. 2D-mesh 기반 분산형 광학 라우터 구조

본 장에서는 WONoC를 위한 2D-mesh 기반의 분산형 파장 라우팅 광학 라우터 (2D-mesh-based Distributed Wavelength-routing Optical Router, 2D-DWOR)의 구조를 제안하고자 한다.  $n \times n$ 의 2D-mesh 구조를 기반으로 한 WONoC는 그림 1과 같이  $N(=n^2)$  개의 PE와 2D-DWOR, 각 라우터를 연결하는 도파관과 네트워크

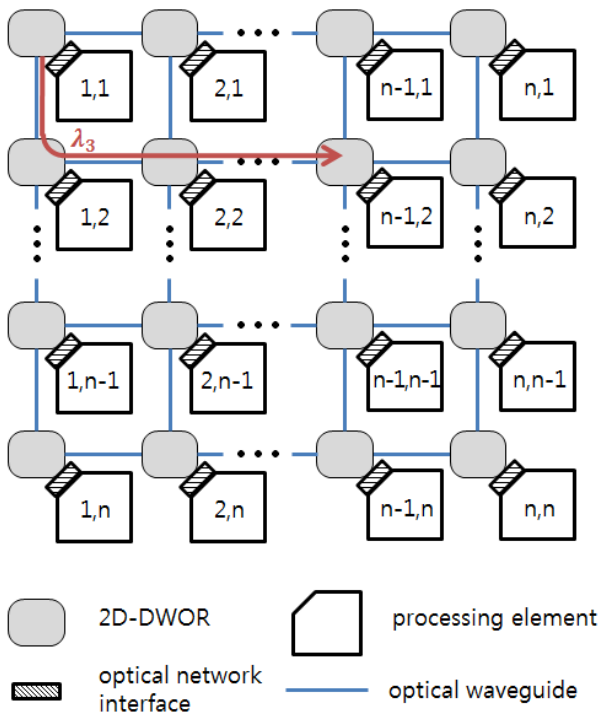


그림 1.  $n \times n$  2D-mesh 기반의 WONoC  
Fig. 1.  $n \times n$  2D-mesh based WONoC.

인터페이스로 구성된다.

제안하는 2D-DWOR은 그림 2와 같은 구조를 갖는다. 각 라우터는 동, 서, 남, 북에 위치한 라우터로 연결되는 4개의 도파관과 8개의 스위칭 모듈(switching module), 각각 4개의 입력 모듈(injection module)과 출력 모듈(ejection module)을 갖는다. 각 모듈은 4장에서 소개할 최소 개수 파장 할당 기법에 의해 각 커뮤니케이션에 할당되는 파장과 라우팅 경로를 고려하여 변조기/복조기와 MR을 배치한다. 예를 들어 그림 1의 PE(1,1)에서 PE(n-1,2)로 파장  $\lambda_3$ 에 의해 YX-라우팅에 의한 경로로 데이터가 전송 될 경우 (1,1)의 입력 모듈 I2에는  $\lambda_3$  변조기, (n-1,2)의 출력 모듈 E4에는  $\lambda_3$  복조기, (1,2)의 스위칭 모듈 S6에는  $\lambda_3$ 의 스위칭 MR이 배치된다.

스위칭 모듈의 스위칭 MR은 전송 경로의 출발지  $(x_S, y_S)$ 와 목적지  $(x_D, y_D)$ 의 위치 관계에 따라 사용되지 않을 수 있다. 출발지와 목적지가 직선상에 위치한 경우, 즉  $x_S = x_D$  또는  $y_S = y_D$  일 때 해당 커뮤니케이션은 스위칭 MR을 거치지 않고 데이터를 전송한다. 이러한 이유로 2D-DWOR은 기존 중앙 집중형 라우터

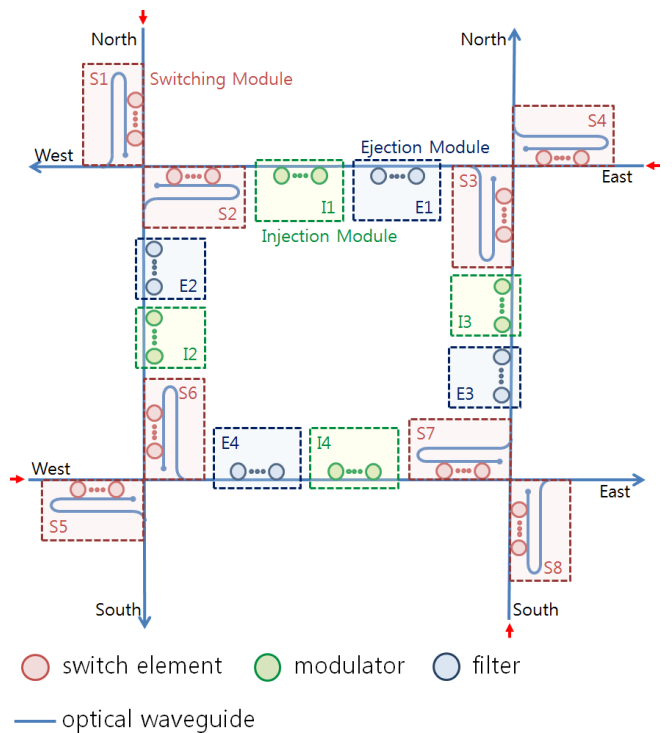


그림 2. 2D-DWOR 구조  
Fig. 2. 2D-DWOR architecture.

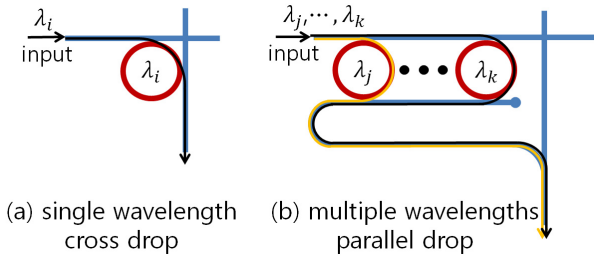


그림 3. 파장 수에 따른 스위치 구조  
Fig. 3. Switch structure depending on the number of wavelength.

에 비해 적은 수의 스위칭 MR을 필요로 한다.  $N$  개의 PE를 갖는 WONoC를 2D-DWOR로 구성할 때 필요한 스위칭 MR의 수는 다음과 같이 유도 할 수 있다.

먼저, 커뮤니케이션 집합  $C(R_n)$ 은 XY-라우팅에 의해 라우터  $R_n$ 에서 스위칭 된다고 가정한다.  $R_n$ 에서 X축에서  $R_n$ 을 제외한  $\sqrt{N}-1$  개의 PE로부터 Y축에서  $R_n$ 을 제외한  $\sqrt{N}-1$  개의 PE로 광신호를 스위칭 할 수 있도록  $(\sqrt{N}-1)^2$  개의 스위칭 MR을 가져야 한다. 라우터는 PE의 수, 즉  $N$  개만큼 존재하므로 전체 네트워크에 필요한 MR의 수는  $N(\sqrt{N}-1)^2$ 이다.

2D-DWOR은 라우터 디자인의 복잡도를 줄이기 위해 스위칭 모듈에 중첩되는 파장 수에 따라 MR 및 도파관의 배치를 달리한다. 그림 3과 같이 단일 파장의 광파가 지날 경우 도파관의 추가 없이 하나의 스위칭 MR 만을 추가하고, 다중 파장의 광파를 진행시킬 때에는 평행 구조의 도파관과 각 파장을 공명시킬 스위칭 MR을 추가한다. 다중 파장을 스위치 하는 구조는 MR 수뿐만 아니라 추가적인 도파관이 필요하게 되고 경로 중첩에 의해 파장 수가 증가 할 수 있으므로 본 논문의 IV장에서 제시하는 최소 개수 파장 할당 기법은 라우팅 경로가 분산 되도록 고려한다.

#### IV. 최소 개수 파장 할당 기법

WONoC는 고정된 커뮤니케이션 패턴을 고려하여 설계 단계에서 각 커뮤니케이션에 파장을 할당하고 이에 맞는 라우터를 구성한다. 파장 수의 증가는 광학 장치의 비용 증가뿐만 아니라 광파의 간섭현상 등에 의해 광신호를 감쇄시켜 WONoC의 성능을 저하시키는 요인이 된

다. 따라서 본 장에서는 특정 커뮤니케이션 패턴을 고려할 때, WONoC 구성을 위한 최소한의 파장 수를 찾고 이를 각 커뮤니케이션에 할당하는 최소 개수 파장 할당 기법을 기술한다. 2D-DWOR의 각 모듈은 최소 개수 파장 할당 기법에 의해 구성된다.

##### 1. 최소 개수 파장 할당 기법을 위한 전제

최소 개수 파장 할당 기법을 적용하기에 앞서, 본 논문에서는  $n \times n$  2D-mesh의 WONoC로 구성하기 위한 커뮤니케이션 그래프가  $N(=n^2)$  개의 PE에 매핑 되어있다고 가정한다.  $N$  개의 전체 PE에서 발생한  $k$  개의 커뮤니케이션은  $c_i(i=1,2,\dots,k)$ 로 나타낸다.

2D-DWOR을 위한 라우팅 알고리즘은 최소한의 스위칭 MR을 사용하기 위하여 1개의 스위칭 MR로 라우팅이 가능한 XY-라우팅과 YX-라우팅을 사용한다. 라우팅 알고리즘을 XY-라우팅 또는 YX-라우팅으로 고정시키지 않은 것은 광신호의 방향 전환이 한 라우터에 집중되어 특정 라우터의 구조가 복잡해지는 것과 경로의 중첩에 의해 파장 수가 증가하는 것을 방지하기 위함이다.

##### 2. 최소 개수 파장 할당 기법

2D-mesh 기반의 2D-DWOR을 위한 파장 할당 기법은 최소한의 파장 수를 찾기 위해 아래의 사항들을 고려한다.

- 1) 각 커뮤니케이션은 XY-라우팅과 YX-라우팅 중 한 가지를 선택한다. 이 때 라우팅 방법의 선택의 기준이 되는 것은 각 링크(라우터로 구분되는 도파관의 구간)를 지나는 커뮤니케이션의 수를 최소화하는 것이다.
- 2) 각 커뮤니케이션은 하나의 파장을 할당 받고, 3) 하나의 링크에서 서로 다른 커뮤니케이션이 같은 파장을 사용하는 것을 허용하지 않는다.

본 논문은 위의 고려 사항들을 만족시키는 최적 해를 찾기 위해 각 고려 사항을 이진 정수 선형 계획법(binary integer linear programming, BILP)으로 기술하고 심플렉스법(Simplex method)에 의해 문제를 해결한다. BILP는 목적함수와 제약조건 및 변수의 경계조건을

갖는다. 목적함수는 제약조건을 만족하는 경계조건 하의 변수에 의해 값을 갖게 되고 그 값의 최대/최소 값을 찾는 것이 BILP의 목적이다.

BILP의 제약조건과 목적함수를 표현하는 각 기호는 다음과 같다.

- $C = \{c_1, c_2, c_3, \dots, c_k\}$  :  $N$  개의 PE에서 발생한  $k$  개의 커뮤니케이션의 집합. 단,  $0 < k \leq \frac{N(N-1)}{2}$
- $R = \{XY, YX\}$  : 각 커뮤니케이션이 선택 가능한 라우팅 알고리즘의 집합.
- $W = \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N\}$  :  $N$  개의 PE 발생한 모든 커뮤니케이션  $c_i$ ,  $\forall c_i \in C$  에 할당 가능한 파장의 집합.
- $z_{c_i, r, \lambda_j}$  : 커뮤니케이션  $c_i$ 가  $r$ 의 라우팅 방법을 사용하는 경우, 파장  $\lambda_j$ 의 할당 여부를 나타내기 위해 0 또는 1의 값을 갖는 이진(binary) 변수.

#### 가. 제약 조건

제약 조건은 아래와 같이 (1) 라우팅 경로 선택, (2) 각 커뮤니케이션의 파장 할당, (3) 각 링크에서 중복되지 않는 파장 할당 등의 세 가지로 정리 할 수 있다.

##### (1) 라우팅 경로 선택의 제약 조건

4장 1절에서 언급한 것과 같이 우리는 WONOc에 XY- / YX-라우팅 알고리즘을 사용한다. 커뮤니케이션  $c_i$ 는 XY-라우팅과 YX-라우팅 중 한 가지 라우팅 방법을 선택한다.

$$c_i = c_{i, XY} + c_{i, YX} = 1, \quad i \in \{1, 2, 3, \dots, k\} \quad (1)$$

$c_{i, XY}$ 와  $c_{i, YX}$ 는  $c_i$ 의 라우팅 방법에 따라 각각 0 또는 1의 값을 갖는다. 예를 들어  $c_3$ 이 YX-라우팅을 하게 되면  $c_{i, XY}$ 의 값은 0,  $c_{i, YX}$ 의 값은 1이 된다.

##### (2) 커뮤니케이션 파장 할당의 제약 조건

XY-라우팅 또는 YX-라우팅으로 라우팅 경로가 설정된 커뮤니케이션  $c_{i, r}$ 은 집합  $W$ 의 파장 중 사용 가능한 하나의 파장을 할당받는다.

$$c_{i, r} = \sum_{j=1}^n z_{c_i, r, \lambda_j} = 1, \quad \forall c_i \in C, r \in R \quad (2)$$

변수  $z_{c_3, YX, \lambda_2}$ 가 1의 값을 가지면 커뮤니케이션  $c_3$

는 YX-라우팅을 하고, 파장  $\lambda_2$ 을 할당 받았음을 나타낸다.

##### (3) 링크의 파장 중복을 피하기 위한 제약 조건

제약조건 (2)에서는 각 커뮤니케이션에 하나의 파장이 할당되어야 함을 나타낸다. 그러나 할당된 파장이 각 링크에서 다른 커뮤니케이션의 파장과 중복되는 것은 허용되지 않는다. 이를 수식화 하면 다음과 같다.

$$L_{z, \lambda_j} = \sum_{c_k \in C(L_z)} z_{c_k, r, \lambda_j} \leq 1, \quad \forall r \in R, \lambda_j \in W \quad (3)$$

링크  $L_z$ 를 지나는 커뮤니케이션의 집합을  $C(L_z)$ 라 할 때, 이 중에서 특정 파장  $\lambda_j$ 을 할당 받은 커뮤니케이션  $c_k$ 는 오직 하나이고 해당하는 변수  $z_{c_k, r, \lambda_j}$ 는 1의 값을 갖는다. 만약 링크  $L_z$ 을 지나는 커뮤니케이션 중 파장  $\lambda_j$ 을 할당 받은 커뮤니케이션이 존재하지 않으면  $L_{z, \lambda_j}$ 의 값은 0이 된다.

#### 나. 목적 함수

제안하는 최소 개수 파장 할당 기법은 WONOc의 설계 시 필요한 파장 수를 최소화 하는 것을 목표로 한다. 따라서 위의 세 가지 제약조건을 만족시키면서 가장 적은 종류의 파장을 선택하도록 목적함수를 정의한다.

각 커뮤니케이션은 집합  $W$ 에 속한 파장을 할당 받는다. 이 때, 할당 되는 파장에 따라 목적 함수에 가중되는 값을 다르게 하고 결과적으로 가중치가 낮은 파장이 선택되어 목적함수가 최솟값을 갖도록 한다. 목적함수는 아래와 같이 표현된다.

$$\text{minimize } \sum_{i=1}^k \left( \sum_{j=1}^n (z_{c_i, r, \lambda_j} \times j) \right) \quad (4)$$

정의된 목적함수에 의하면 커뮤니케이션  $c_i$ 에  $\lambda_j$ 가 할당될 경우  $j$ 의 값이 가중된다. 목적함수는 낮은 수의  $j$ 를 갖는 파장  $\lambda_j$ 를 할당하여 라우팅에 사용되는 파장 수를 최소화한다.

## V. 비교 및 분석

우리는 IV장의 BILP로 기술한 최소 개수 파장 할당 기법을 MATLAB을 이용한 심플렉스법(simplex

method)으로 해결하였다. 이번 장에서는 제안하는 최소 개수 파장 할당 기법에 의해 2D-DWOR에서 사용되는 파장 수, 스위칭 MR의 수 및 신호 감쇄량에 대한 비교 및 분석을 보인다.

2D-DWOR은 WONOc의 설계 시, 각 PE간 연결 정도에 따라 최소 개수 파장 할당 기법에 의해 최소한의 파장 수를 결정한다. 연결 정도(connectivity,  $K$ )는 식 (5)와 같이 표현된다.

$$K = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{N_C(PE_i)}{N-1} \quad (5)$$

식 (5)의  $N_C(PE_i)$ 는  $PE_i$ 의 커뮤니케이션의 수이다.  $\frac{N_C(PE_i)}{N-1}$ 는  $PE_i$ 가 연결 가능한 전체 ( $N-1$ )개의 PE 중 연결된 PE 수의 비율이고,  $K$ 는 모든 PE의 연결 비율의 합을  $N$ 으로 나눈 평균 값이다. 구간 (0,1]의 값을 갖는  $K$ 는  $K=1$ 일 때, 각 PE가 모든 PE와 연결되어 있음을 의미한다.

그림 4는 8x8 WONOc를 중앙 집중형 라우터인  $\lambda$ -라우터와 제안하는 2D-DWOR로 구성할 때 연결 정도 ( $K$ )에 따라 필요한 파장 수를 나타내었다. random 패턴은 각 PE가 64개의 PE 중 임의의 PE와 연결된 것이고, adjacent 패턴은 목적지 PE의 위치가 출발지 PE에서 가까운 순서로 결정된 것이다. hotspot 패턴은 중앙에 위치한 4개 PE의  $K$ 가 다른 PE의  $K$ 보다 2배

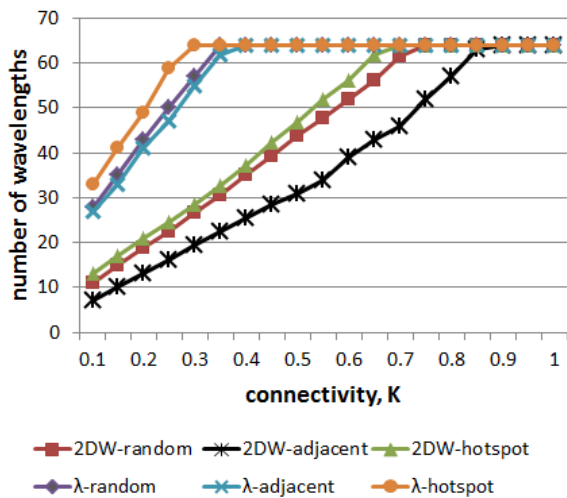


그림 4. PE 연결정도에 따른 파장 수  
Fig. 4. The number of wavelength according to PE connectivity.

높은 경우를 가정하였다. 2D-DWOR은  $\lambda$ -라우터보다 높은  $K$ 에서 최대 파장 수에 도달한다. 분산형 라우터인 2D-DWOR은 최소 개수 파장 할당 기법에 의해 경로의 중첩을 최소화 하여 중첩되지 않은 커뮤니케이션에 같은 파장을 사용할 수 있다. 하지만,  $\lambda$ -라우터는 라우팅 경로를 바꿀 수 없는 구조의 중앙 집중형 라우터이기 때문에 파장 수를 줄이는데 한계가 있다. 또한, 2D-DWOR에서는 같은  $K$ 에서 adjacent 패턴이 random 패턴에 비해 적은 수의 파장을 사용한다. 이것은 adjacent 패턴이 random 패턴에 비해 각 커뮤니케이션 경로의 중첩이 적기 때문이다. 그림 4의 실험 결과에서는  $0.1 < K < 0.3$ 의 연결정도 갖는 실질적인 어플리케이션<sup>[13-15]</sup>을 적용하여 2D-DWOR이  $\lambda$ -라우터에 비해 평균 56% 감소된 파장 수를 사용함을 보였다.

그림 5는 2D-DWOR과 중앙 집중형 라우터의 스위칭 MR 수를 비교한 결과이다. 기존 연구에서는 PE의 수가  $N$ 이고  $K=1$ 일 때, 광학 크로스바<sup>[13]</sup>는  $N^2$ 개,  $\lambda$ -라우터<sup>[4]</sup>는  $N(N-1)$ 개, GWOR<sup>[6]</sup>은  $N(N-2)$ 개의 스위칭 MR이 필요하다. 하지만 2D-DWOR은 커뮤니케이션의 출발지와 목적지가 직선상에 위치 할 경우 같은 도파관에서의 전송이 가능해 스위칭 MR이 필요하지 않기 때문에 III장에서 유도한 바와 같이  $N(\sqrt{N}-1)^2$ 의 스위칭 MR을 사용한다. 따라서, 2D-DWOR은 GWOR에 비해 8x8 네트워크에서 21% 적은 수의 스위칭 MR만을 필요로 하게 된다.

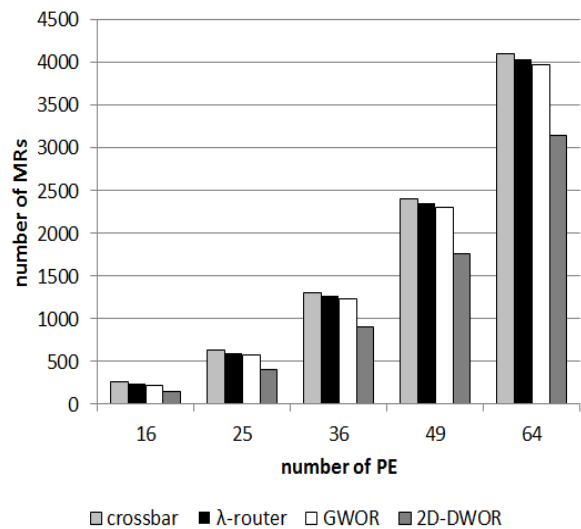


그림 5. 스위칭 MR의 수 비교  
Fig. 5. Comparison of the number of switching MRs.

표 1. 광신호 전력 손실의 비교  
Table 1. Comparison of optical signal power loss.

	PE	$\lambda$ -router		GWOR		2D-DWOR	
		Avg	Max	Avg	Max	Avg	Max
4x4	16	3.18	3.28	2.46	4.62	1.83	3.30
5x5	25	4.30	4.36	3.09	6.78	2.48	4.41
6x6	36	5.63	5.68	3.84	9.42	3.29	5.93
7x7	49	7.20	7.24	4.70	12.54	4.35	7.94
8x8	64	9.01	9.04	5.70	16.14	5.39	10.54

(단위: dB)

광신호는 WONoC의 네트워크를 거치면서 신호의 감쇄가 발생한다. 광신호의 감쇄는 식 (6)과 같이 도파관에서의 전달 손실( $L_{propagation}$ ), 도파관 교차 손실( $L_{cross}$ ), MR 공명 손실( $L_{MR,drop}$ ), MR 통과 손실( $L_{MR,through}$ ) 등 도파관과 스위칭 MR의 수에 영향을 받는다.

$$Power\ Loss\ (dB) = l_{link} \cdot L_{propagation} + \sum L_{cross} + \sum L_{MR,drop} + \sum L_{MR,through} \quad (6)$$

8x8 네트워크에서 각각  $\lambda$ -라우터, GWOR, 2D-DWOR을 사용할 경우 신호 전력의 최대 손실, 평균 손실은 [표 1]과 같다. 2D-DWOR은 분산형의 구조이기 때문에 도파관의 교차 수가 적은 반면 광신호가 통과하는 변조기/복조기의 수가 많아져  $\lambda$ -라우터에 비해 최대 손실이 소폭 증가됨을 보인다. 하지만, 평균 손실을 비교해 볼 때,  $\lambda$ -라우터는 모든 커뮤니케이션이 거치는 MR 및 도파관 교차의 수가 최대 손실의 경우와 비슷한 반면, 2D-DWOR은 커뮤니케이션의 거리가 가까울수록 신호 감쇄량이 적어진다. 칩의 설계 단계에서 PE의 위치를 결정할 수 있는 WONoC는 각 커뮤니케이션의 출발지-목적지를 고려한 매핑을 적용하면 최대 손실의 경우를 피해 2D-DWOR의 평균 손실량을 더욱 낮출 수 있다.

## VI. 결 론

본 논문에서는 WONoC의 확장성을 위한 2D-mesh 기반의 분산형 라우터인 2D-DWOR를 제시하고, 라우팅에 필요한 파장 수를 최소화하기 위해 특정 커뮤니케이션 패턴을 고려한 최소 개수 파장 할당 기법을 소개하였다.

파장 할당의 문제는 이진 정수 선형 계획법으로 기술하여 MATLAB의 심플렉스법으로 해결하였고 이를 통해 8x8 네트워크에 필요한 파장 수 및 스위칭 MR 수를

비교하였다. 2D-DWOR은 중앙 집중형 라우터에 비해 실질적인 어플리케이션의 연결정도인  $0.1 < K < 0.3$  [14-16]의 조건에서 평균 56% 감소된 파장 수, 21% 적은 스위칭 MR 수를 사용하였다. 제안한 최소 개수 파장 할당 기법은 WDM을 적용한 ONoC의 확장성을 고려하여 파장 수가 증가함에 따른 비용 증가 및 광신호 감쇄에 의한 성능 저하 문제를 해결하였다.

향후에는 PE간 커뮤니케이션을 고려한 매핑과 파장 할당 기법을 동시에 적용하여 더 적은 파장 수 및 신호 감쇄를 이루어 저비용의 ONoC 설계를 위한 방법을 제시 할 수 있을 것이다.

## REFERENCES

- [1] A. Shacham, K. Bergman, and L. P. Carloni, "On the Design of a Photonic Network-on-Chip," in 1<sup>st</sup> IEEE/ACM Int. Symp. on Networks on chip(NOCS), pp. 53-64, Washington, DC, USA, May 2007.
- [2] A. shacham, K. Bergman, and L. P. Carloni, "Photonic Networks-on-chip for future generations of chip multiprocessors," IEEE transactions on Computers, Vol. 57, Issue. 9, pp.1246-1260, Sep 2008.
- [3] H. Gu, K. H. Mo, J. Ku, and W. Zhang, "A low-power low-cost optical router for optical networks-on-chip in multiprocessor systems-on-chip," in VLSI, IEEE Computer Society Annal Symposium on, pp. 19-24, Tampa, FL, May 2009.
- [4] M. Briere, L. Carrel, T. Michalke, F. Mieveville, I. O. Connor and F. Gaffiot, "Design and behavioral modeling tools for optical network-on-chip," in Design, Automation and Test in Europe(DATE), vol.1, pp. 738-739, Ecully, France, Feb 2004.
- [5] I. O'Connor, F. Mieveville, F. Gaffiot, A. Scandurra, and G. Nicolescu, "Reduction Methods for Adapting Optical Network on Chip Topologies to Specific Routing Applications," In Proceedings of the Design of Circuits and Integrated Systems, DCIS, Grenoble, France, November 2008.
- [6] X. Tan, M. Yang, L. Zhang, Y. Jiang and J. Yang, "A generic optical router design for photonic network-on-chips," IEEE Journal of Lightwave Technology, Vol. 30, Issue. 3, pp.

- 368-376, Feb 2011.
- [7] L. Bai, H. Gu, Y. Yang, and X. Yu, "A WDM multi-waveguide low blocking architecture for ONoC", *Optics & Laser Technology*, Volume 47, pp. 355 - 360, April 2013.
- [8] J. Chan and K. Bergman, "Photonic interconnection network architectures using wavelength-selective spatial routing for chip-scale communications," *IEEE/OSA Journal of Optical communications and networking*, Vol. 4, Issue. 3, pp. 189-201, March 2012.
- [9] S. Koochi, M. Abdollahi and S. Hessabi, "All-Optical wavelength-routed NoC based on a novel hierarchical topology," in 5<sup>th</sup> IEEE/ACM Int. Symp. on Networks on chip(NOCS), pp. 97-104, Pittsburgh, PA, USA, May 2011.
- [10] H. Gu, J. Xu, and W. Zhang, "A Low-power Fat Tree-based Optical Network- on-Chip for Multiprocessor System-on-Chip," *Design, Automation and Test in Europe Conference and Exhibition (DATE)*, pp. 3-8, Nice April 2009
- [11] B. G. Lee, X. Chen, A. Biberman, X. Liu, I. Hsieh, C. Chou, J. Dadap, R. M. Osgood, and K. Bergman, "Ultrahigh-Bandwidth WDM Signal Integrity in Silicon-on-Insulator Nanowire Waveguides," *Lasers and Electro-Optics Society*, pp. 472-473, Lake Buena Vista, FL, Oct 2007.
- [12] P. J. Winzer, M. Pfennigbauer, R. Essiambre, "Coherent crosstalk in ultradense WDM systems," *Journal of lightwave technology* Vol, 23, No. 4 , April 2005.
- [13] A. W. Poon, F. Xu and X. Luo, "Cascaded active silicon microresonator array cross-connect circuits for WDM networks-on-chip," in *Proc. SPIE, Silicon Photonics Conference*, San Jose, CA, USA, Feb 2008.
- [14] J. Hu, and R. Marculescu, "Energy-Aware Mapping for Tile-based NoC Architectures Under Performance Constraints," *Design Automation Conference, Proceedings of the ASP-DAC 2003*, pp.233-239, Jan 2003.
- [15] C. Roig, A. Ripoll, and F. Guirado, "A New Task Graph Model for Mapping Message Passing Applications," *IEEE transactions on Parallel and Distributed Systems*, Vol. 18, Issue. 12, pp.1740-1753, Dec 2007.
- [16] J. Hu, and R. Marculescu, "Energy- and Performance-Aware Mapping for Regular NoC Architectures," *IEEE transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*, Vol.24, Issue. 4, pp.551-562, April 2005.



저 자 소 개



김 영 석(학생회원)  
 2012년 성균관대학교 반도체시스  
 템공학과 학사 졸업.  
 2012년 3월~현재 성균관대학교  
 정보통신대학 석사과정.

<주관심분야 : SoC 설계, NoC>



이 재 훈(학생회원)  
 2011년 성균관대학교 반도체시스  
 템공학과 학사 졸업.  
 2011년 3월 ~ 현재 성균관대학교  
 정보통신대학 석사과정.

<주관심분야 : SoC 설계, 임베디드 시스템>



최 적(학생회원)  
 2012년 연변과학기술대학교 컴퓨  
 터전자통신공학부 학사  
 졸업.  
 2013년 3월 ~ 현재 성균관대학교  
 정보통신대학 석사과정.

<주관심분야 : SoC 설계 및 저전력 설계>



한 태 희(평생회원)  
 1992년 KAIST 전기 및  
 전자공학과 학사 졸업.  
 1994년 KAIST 전기 및  
 전자공학과 석사 졸업.  
 1999년 KAIST 전기 및  
 전자공학과 박사 졸업.

1999년 3월~2006년 8월 삼성 전자 통신연구소  
 책임 연구원.  
 2006년 9월~2008년 2월 한국산업기술대학교  
 전자공학과 조교수.  
 2008년 3월~현재 성균관대학교 정보통신대학  
 반도체시스템공학과 부교수.  
 2011년 5월~2013년 4월 지식경제부  
 시스템반도체 PD

<주관심분야 : SoC 아키텍처 및 설계 방법론, 3D IC, 메모리/스토리지 시스템 구조, 임베디드 SW, IT 융합 기술>