

고성능 컴퓨팅을 위한 인터커넥션 네트워크 기술 동향

조혜영^{1,2*}, 전태준², 한지용²

¹한국과학기술정보연구원 슈퍼컴퓨팅본부

²한국과학기술원 전산학부

The Technology Trend of Interconnection Network for High Performance Computing

Hyeyoung Cho^{1,2*}, Tae Joon Jun², Jiyong Han²

¹Division of Supercomputing, Korea Institute of Science and Technology Information

²School of Computing Korea Advanced Institute of Science and Technology

요약 반도체 집적 기술의 발전으로 중앙처리장치 및 저장장치가 소형화되고 성능이 빠르게 발전되면서 고성능 컴퓨팅(High Performance Computing) 분야에서 인터커넥션 네트워크가 전체 시스템의 성능을 결정하는데 더욱 중요한 요소가 되고 있다. 본 논문에서는 고성능컴퓨팅 분야에서 사용되는 인터커넥션 네트워크 기술 동향을 분석하였다. 2017년 6월 기준 슈퍼컴퓨터 Top 500에서 가장 많이 사용하고 있는 인터커넥트는 인피니밴드이다. 최근 이더넷은 40/100Gbps 기가비트 이더넷 기술의 등장으로 인피니밴드 다음으로 높은 점유율을 보이고 있다. 지연(latency) 성능이 인피니밴드에 비해 떨어지는 기가비트 이더넷은 비용 대비 효율을 중시하는 중형급 데이터 센터에서 선호하고 있다. 또한 고성능을 요구하는 최상위 HPC 시스템들은 기존의 이더넷, 인피니밴드 기술에서 벗어나, 자체적인 인터커넥트 네트워크를 도입하여 시스템의 성능을 극대화 하는 노력을 하고 있다. 향후 고성능 인터커넥트 분야는 전기 신호기반 데이터 통신에서 한 단계 도약하여, 빛으로 데이터를 주고받는 실리콘 반도체 기반 광송수신 기술이 활용될 것으로 예상된다.

• 주제어 : 고성능 컴퓨팅, 인터커넥션 네트워크, 클러스터, 정보통신, 융합 IT응용기술

Abstract With the development of semiconductor integration technology, central processing units and storage devices have been miniaturized and performance has been rapidly developed, interconnection network technology is becoming a more important factor in terms of the performance of high performance computing system. In this paper, we analyze the trend of interconnection network technology used in high performance computing. Interconnect technology, which is the most widely used in the Supercomputer Top 500(2017. 06.), is an InfiniBand. Recently, Ethernet is the second highest share after InfiniBand due to the emergence of 40/100Gbps Gigabit Ethernet technology. Gigabit Ethernet, where latency performance is lower than InfiniBand, is preferred in cost-effective medium-sized data centers. In addition, top-end HPC systems that demand high performance are devoting themselves from Ethernet and InfiniBand technologies and are attempting to maximize system performance by introducing their own interconnect networks. In the future, high-performance interconnects are expected to utilize silicon-based optical communication technology to exchange data with light.

• Key Words : High Performace Computing, Interconnection Network, Cluster, information communication, IT application technology

*Corresponding Author : 조혜영(chohy@kisti.re.kr)

Received May 17, 2017

Accepted August 20, 2017

Revised August 8, 2017

Published August 28, 2017

1. 서론

최근 반도체 기술에 빠르게 발전함에 따라 중장처리 장치를 비롯한 단위 계산 노드의 성능이 급격히 높아지고 있다. 이에 따라 수십 수 만대의 계산 노드를 연결하여 시스템을 가동하는 고성능 컴퓨팅(High Performance Computing) 분야에서는 인터커넥션(interconnection) 네트워크가 전체 시스템의 성능을 결정하는데 중요한 요소가 되고 있다[1,2].

1993년부터 세계의 고성능 슈퍼컴퓨터에 대한 상세 정보 및 순위를 제공하고 있는 Top500[3]에 따르면 최근의 슈퍼컴퓨터들은 잘 알려진 이더넷이나 인피니밴드 이외에도 자체 개발한 인터커넥션 Sunway TaihuLight의 Sunway, Tianhe-2의 TH Express-2, K 컴퓨터의 Tofu 등 시스템 환경에 맞는 인터커넥션 네트워크 기술을 다양하게 적용하고 있다.

본 논문에서는 고성능컴퓨팅 분야에서 사용되는 인터커넥션 네트워크 기술 동향을 분석하고 대표적인 고성능 네트워크 기술에 대해 분석한다.

2장에서는 Top500[3]으로 대표되는 슈퍼컴퓨터의 인터커넥트 동향에 대해서 분석하고, 3장에서는 주요 인터커넥트 기술에 대해서 분석한다. 그리고 마지막으로 4장에서는 분석 결과와 결론에 대해 기술한다.

2. 슈퍼컴퓨터 인터커넥트 동향

인터커넥션 네트워크는 슈퍼컴퓨터 구조에 있어서 핵심적으로 고려되어야 할 요소로 각국의 슈퍼컴퓨터는 그에 걸맞은 우수한 인터커넥션 네트워크를 적용하고 있다. 표 1은 2016년 11월 기준 Top 500 슈퍼컴퓨터에 적용된 인터커넥션 네트워크의 분배 비율을 나타낸다. Top 500에 사용된 대표적인 인터커넥션 네트워크를 분석하면, 현재 가장 강력한 슈퍼컴퓨터인 중국 Sunway

TaihuLight의 Sunway, Tianhe-2의 TH Express-2, 세 번째로 강력한 미국 Titan의 Cray Gemini, 2011년 11월 까지 가장 강력한 슈퍼컴퓨터였고 현재는 36위인 일본 K 컴퓨터의 Tofu, 현재 3, 6, 9, 11, 12순위 슈퍼컴퓨터에 적용된 Cray Interconnect (Aries/Gemini), 14위 슈퍼컴퓨터인 Pleiades에 적용되었고 전체 Top 500 슈퍼컴퓨터 중 약 37%에 적용된 인피니밴드, 마지막으로 전체 Top 500 슈퍼컴퓨터의 약 41.4%에 적용된 기가비트급 이더넷 등 인터커넥션 네트워크 등 크게 총 7가지로 분류할 수 있다.

3. 고성능 인터커넥트 기술

3.1 Sunway Interconnect

Sunway 인터커넥트는 현재 Top500의 1위 시스템 Sunway TaihuLight의 상호연결망 기술로써, 중국에서 자체 구축한 인터넷네트워크 기술이다[4]. 노드들은 Sunway Network라고 하는 PCI-E 3.0 연결을 사용하여 연결된다. Sunway 맞춤 네트워크는 3가지 레벨로 구성되며 상단에 중앙 스위칭 네트워크가 있다. 중간에 있는 슈퍼노드 네트워크는 각 슈퍼노드 내의 모든 256노드를 연결하여 높은 대역폭과 낮은 대기 시간의 통신을 제공한다.

양방향(Bisection) 네트워크 대역폭은 70TB/s이며, Mellanox가 호스트 채널 어댑터 (HCA)와 스위치 칩을 공급했다. Sunway TaihuLight를 위해 MPI를 통한 노드 간 통신은 12GB/sec.이고, 지연(Latency) 시간은 약 1us이다.

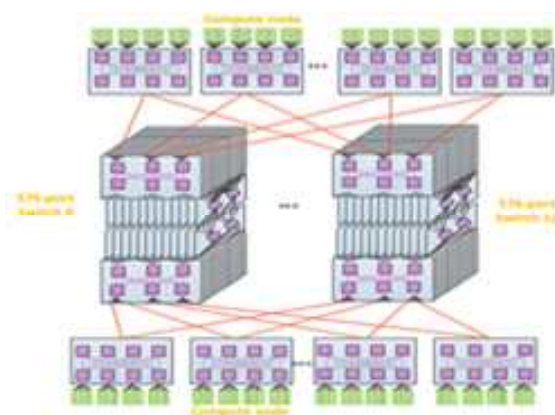
전체 시스템은 40개의 캐비닛으로 구성되며 각 캐비닛에는 4개의 캐비닛 슈퍼 노드와 각 슈퍼 노드에는 256개의 노드가 있다. 각 노드에는 실측 부동소수점 연산의 트 성능(Rpeak)은 3.06Tflop/s이다.

<Table 1> Distribution and performance of interconnection networks(Top500, November 2016)

| Interconnect | Count | System Share (%) | Rmax (GFlops) | Rpeak (GFlops) | Cores |
|-------------------|-------|------------------|---------------|----------------|------------|
| Ethernet | 207 | 41.4 | 110,354,678 | 238,747,013 | 8,364,448 |
| Infiniband | 185 | 37 | 182,353,488 | 247,858,895 | 9,066,658 |
| Cray interconnect | 45 | 9 | 131,325,990 | 191,289,695 | 5,175,772 |
| Intel Omni-Path | 28 | 5.6 | 43,672,750 | 64,890,729 | 1,617,076 |
| Tofu1/Tofu 2 | 7 | 1.4 | 21,975,200 | 23,946,105 | 1,136,208 |
| TH Express-2 | 2 | 0.4 | 35,934,090 | 57,976,934 | 3,294,720 |
| Sunway | 1 | 0.2 | 93,014,594 | 125,435,904 | 10,649,600 |
| Etc. | 25 | 5 | 53,481,588 | 65,097,605 | 4,688,864 |
| Total | 500 | 100 | 672,112,378 | 1,015,242,880 | 43,993,346 |

3.2 TH Express-2

TH Express-2는 중국의 텐허-2(Tianhe-2) 슈퍼컴퓨터에 사용된 인터커넥션 네트워크이다. 텐허-2는 2015년 현재 가장 강력한 슈퍼컴퓨터로 중국 NUDT(National University of Defense Technology)에 설치되어 있으며 총 16,000개의 서버 노드로 구성되어 있으며 33.86 페타플롭스(petaflop/s)의 성능을 보인다[5]. 인텔사의 Xeon CPU Xeon Phi를 가속기로 사용하였으며 1.4 페타 바이트의 메인메모리가 탑재되어있다. TH Express-2 인터커넥션 네트워크는 NUDT에서 설계하였으며 576포트를 갖는 13개의 스위치를 이용한 Fat Tree 토폴로지 구조의 인터커넥션 네트워크이다. 또한 광전자 하이브리드 전송(Opto-electronic hybrid transport) 기술을 사용하였다. 그림 1은 TH Express-2 인터커넥션 네트워크에 사용된 Fat Tree 토폴로지 구조를 나타낸다[6]. TH Express-2 인터커넥션 네트워크는 자체적으로 개발한 NRC(Network Route Control)와 NIC(Network Interface Chip)를 사용한다. NIC는 사용자 어플리케이션이 고성능 네트워크에 접속하기 위한 SW/HW 인터페이스를 제공한다. TH Express-2의 NIC는 16 레인의 PCI-E 3.0 인터페이스를 통해 컴퓨터 노드와 연결되어 있으며, 사용자 레벨 통신 보호(User-level communication protection), RDMA 등의 기능을 지원한다.



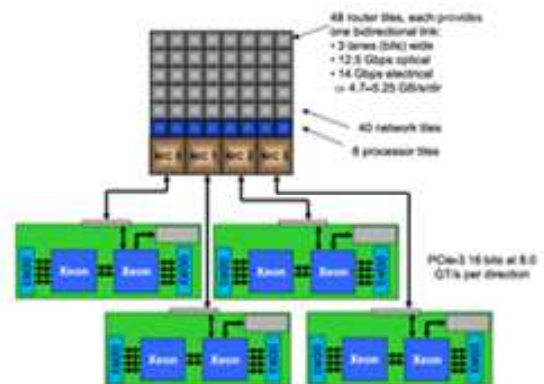
[Fig. 1] TH Express-2 Fat Tree Architecture[6]

3.3 Cray Interconnect

현재 Top500에서 성능 3위를 차지한 미국의 Titan 슈퍼컴퓨터는 Cray XC 시스템의 이전 버전인 Cray XK7 시스템을 기반으로 제작된 슈퍼컴퓨터이며, 상위 10개 슈퍼컴퓨터 중 5, 8, 10위를 차지한 미국의 Cori, 스위스

의 Piz Daint, 미국의 Trinity 슈퍼컴퓨터는 모두 Cray XC 시스템을 기반으로 제작될 만큼 고성능 컴퓨팅 분야에서 Cray 시스템이 차지하는 비중은 높다고 할 수 있다.

Cray XC 시리즈에 사용되는 인터커넥트 SoC(System on Chip)의 이름이 Aries이며, Aires NIC는 Cray 이전 시스템에 사용되었던 Gemini NIC의 하드웨어 파이프라인을 기반으로 업그레이드한 NIC이다. Aries 시스템은 네 개의 NIC, 48포트 라우터, Netlink 멀티플렉서로 구성되어 있다[7]. Cray XC 시스템의 네트워크 구성을 위해서는 Aries 외에 추가적으로 Aries 장치를 서로 연결해 줄 케이블과 Backplane만 있으면 된다. Aries를 구성하는 네 개의 NIC를 Aries NIC라고 하며, Aries NIC는 16X PCI-E Gen3 호스트 인터페이스를 제공한다. 현재 Cray XC 시스템은 이러한 Aries 내의 PCI-E 인터페이스를 네 개의 독립적인 듀얼 소켓 Intel Xeon 계열 노드와 연결하도록 디자인 되어있다. 각 각의 노드는 Intel Xeon E5 프로세서 두 개와 8개의 DDR-3 메모리 채널로 구성되어 있으며 메모리는 노드 당 64GB 또는 128GB로 구성할 수 있다.



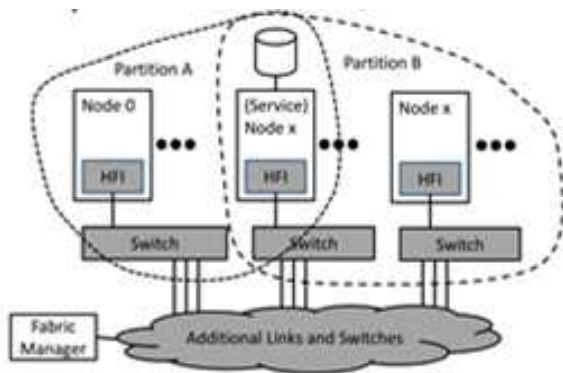
[Fig. 2] Aries System Structure[7]

Aries의 Netlink 멀티플렉서는 시스템 로드 에 따른 패킷의 분산 할당을 지원하는 동적 로드 밸런싱(Dynamic Load Balancing)을 지원한다. Aries 라우터는 8개의 NIC 포트를 40개의 네트워크 포트에 연결시키며 각 각의 포트는 단방향 통신 기준 4.7Gbps에서 5.25Gbps 속도를 보인다. 이러한 Aries는 TSMC 40nm 프로세스 공정으로 제작되며, 12.4Gbps에서 14Gbps 속도인 120개의 네트워크 SerDes(Serializer /Deserializer)와 8Gbps 속도인 64개의 PCI-E SerDes로 구성된다[8,9]. 다이(Die) 크기는

16.6mm x 18.9mm이며 약 2억 1700만개의 게이트로 구성된다.

3.4 Omni-Path Architecture

옵니패스 아키텍처(OPA:Omni-Path Architecture)는 인텔사에서 2014년 발표한 고성능 컴퓨팅 분야용 프로세서 아키텍처이다. OPA는 PCIe 호스트 어댑터, 에지 스위치, 디렉터 스위치, 케이블링 및 오픈소스 소프트웨어를 통틀어서 구성된 End-to-end 패브릭 솔루션이다[10]. 클라이언트에게는 엔트리 급에서 대규모 HPC 클러스터에 이르기까지 다양한 HPC 애플리케이션의 성능을 비용 효율적으로 향상시켜준다는 장점을 줄 수 있다. 인텔 OPA는 인피니밴드 EDR 대비 MPI 지연시간 (Message Passing Interface Latency)을 17% 까지 감소시킨다. 또한 MPI 메세징 속도는 7%가 높아져 향상된 시스템 종합 성능을 제공할 수 있다. 또한 중대형 클러스터에서 인피니밴드에 비해 최대 56% 낮은 스위치 패브릭 레이턴시 (Switch Fabric Latency)와 100Gbps의 회전속도를 제공할 것으로 기대된다. 이러한 아키텍처는 48포트 스위치 칩을 사용하여, 기존 36포트 인피니밴드에 비해 향상된 집적도와 시스템 확장성을 제공할 수 있으며, 스위치 칩 당 최대 33% 증가된 노드 수를 제공하여 시스템 설계를 단순화 하고 인프라 비용을 줄였다.



[Fig. 3] Omni-Path Components

그림 3은 인텔 옵니 패스 아키텍처의 구성 요소를 나타낸다[10]. 패브릭으로의 연결성은 호스트 패브릭 인터페이스 (Host Fabric Interfaces, HFIs)를 통하여 이루어진다. 많은 수의 Endpoint를 연결하기 위하여 다양한 토폴로지에 스위치가 쓰일 수 있다. Fabric Manager 구성 요소는 Fabric resource 들에 대한 중앙 집중형 관리 및

모니터링을 제공한다. 파티션들은 공유 서비스로의 접근을 제공함과 동시에, Endpoint의 그룹을 나누는 isolation을 제공한다.

3.5 Tofu

Tofu는 Torus Fusion의 줄임말로 일본 이화학연구소 (RIKEN)에 설치된 K 컴퓨터 및 그 후속 슈퍼컴퓨터인 PRIMEHPC FX10에 사용된 인터커넥션 네트워크이다 [11]. Tofu는 수십 만 개의 서버 노드에서 확장성을 얻기 위해 개발되었으며, 현재 88,128개의 서버 노드를 갖는 K 컴퓨터와 98,302개의 노드를 갖는 PRIMEHPC FX10의 인터커넥션 네트워크로 사용되었다. Tofu는 ICC(Inter Connect Controller)로 불리는 칩을 사용하여 인터커넥션 네트워크를 구성하며 ICC는 SPARC64 프로세서와 점대점(Point to Point)으로 연결된다. ICC 칩은 한 개의 TNR(Tofu Network Router), 네 개의 TNI(Tofu Network Interface), 그리고 TBI와 PCI Express로 구성되어 있다. TNR은 Tofu 인터커넥션 네트워크의 패킷 전송에 사용되며, TNI는 네트워크로부터 패킷을 전송/전달하는 인터페이스이다. TBI는 여러 패킷을 집합으로 통신하는데 사용되며, PCI Express는 외부 입/출력 카드 및 노드의 연결에 사용된다. TNR은 10포트 Tofu 링크로 제공되며, ICC 칩은 이러한 Tofu 링크를 다른 노드의 최대 10개의 ICC 칩과 연결하는데 사용된다. Tofu 인터커넥션 네트워크는 6차원의 Mesh/Torus 토폴로지를 기반으로 구성된다.

3.6 InfiniBand

현재 Top 500 슈퍼컴퓨터에서 가장 보편적으로 사용되는 인피니밴드는 FDR 인피니밴드로 154개의 시스템에서 사용 중이다. 4X 레인에서 100Gbps 속도를 보이는 EDR 인피니밴드를 사용하는 시스템은 2개로 Top 500 목록에 2015년 처음 진입하였다. QDR 및 DDR 인피니밴드를 사용하는 시스템은 Top 500에서 감소하는 반면 FDR 인피니밴드를 사용하는 시스템이 비율을 꾸준히 증가하고 있다[12,13].

인피니밴드는 네트워크 통신 프로토콜로 프로세서 노드 간 스위치 기반의 점대 점, 양방향 시리얼 링크를 통한 통신을 지원한다. 이러한 모든 시리얼 링크는 링크의 종단점에 각각 하나의 장치와 연결되어 있으며 이를 통해 각 종단의 데이터 전송 특징을 제어한다. 인피니밴드

는 스위치를 통해 프로세서 노드 사이에 독립적이고 보호된 채널을 생성한다. 이러한 채널을 통한 데이터 및 메시징 통신은 RDMA를 통해 CPU의 간섭 없는 통신이 이루어지며 통신의 송/수신 오프로드는 인피니밴드 어댑터에 의해 관리된다. 인피니밴드 어댑터는 PCI Express 인터페이스를 통해 한 쪽 종단의 CPU와 연결되어 있으며 인피니밴드 네트워크 포트를 통해 반대쪽 종단의 인피니밴드 서버넷과 연결되어 있다. 인피니밴드의 위와 같은 특징은 다른 네트워크 통신 프로토콜과 달리 높은 통신 대역폭, 빠른 전송 속도, 높은 확장성 등의 장점을 가능하게 하여, 특히 낮은 지연(Latency) 때문에 HPC분야에서는 많이 활용되고 있다. 인피니밴드는 10GigE에 비해 5-7배 낮은 지연을 가진다[14,15].

3.7 Ethernet

기가비트 이더넷은 Top 500을 구성하는 인터커넥션 네트워크 중 41.4%로 가장 많은 수를 차지하는 네트워크이다. 기가비트 이더넷은 1 Gbps 이상의 속도를 내는 이더넷 전송 기술을 의미하며 IEEE 802.3 표준을 따른다. 2010년대 초반까지만 하여도 기가비트 이더넷은 중급 규모의 데이터 센터, 인피니밴드는 고성능 컴퓨터에 사용하는 네트워크라는 인식이 강하였으나 2012년 이후 IEEE 802.3ba 표준을 따르는 40Gbps, 100Gbps 기가비트 이더넷이 등장함으로써 데이터 전송 속도를 기준으로 기가비트 이더넷과 인피니밴드를 비교하는 것은 크게 의미가 없어졌다. 그러나 지연(latency) 면에서는 인피니밴드와 5-6배이상 차이가 존재하기 때문에 HPC 분야 중에서 지연에 민감한 분야에서는 인피니밴드를 선호한다 [16,17].

그럼에도 불구하고 최근 기가비트 이더넷이 각광받는 첫 번째 이유는 기가비트 이더넷을 사용할 경우 인피니밴드 대비 비용 절감 효과를 누릴 수 있기 때문이다. 지연에 민감한 최고 수준의 Top500에서는 이더넷이 영향력을 크게 발휘하지 못하지만, 클라우드 서비스를 제공하는 데이터 센터처럼 비용 대비 효율성을 중시하는 대규모 시스템의 경우 기가비트 이더넷을 선호한다. 대표적인 Public 클라우드 서비스인 아마존 Web 서비스 역시 10Gbps 이더넷을 네트워크로 사용하고 있다.

두 번째는 사용의 편의성에 있다. 인피니밴드는 대부분의 네트워크 시스템 엔지니어에게 익숙하지 않은 환경이며 소수의 고성능 컴퓨팅 분야의 엔지니어에게 보편적

인 환경이다. 반면 이더넷은 10/100Mbps 이더넷에서부터 100Gbps 이더넷까지 모두 OSI 계층 구조를 따르는 동일한 표준 구조이며 속도의 차이만 있을 뿐 기능에 있어서는 크게 차이점이 존재하지 않는다. 이러한 익숙한 개발 및 유지 보수 환경이 기가비트 이더넷을 보편적으로 사용하게 하는 원인이라고 볼 수 있다.

또한 고성능 컴퓨터에서 인피니밴드가 이더넷을 앞서는 가장 큰 이유인 RDMA 지원 여부 또한 이더넷에서 RoCE(RDMA on Converged Ethernet) 기술을 통해 지원 가능해짐으로써 기가비트 이더넷은 현재 고성능 컴퓨터 분야에서도 인피니밴드와 경쟁을 하고 있는 가장 큰 대항 세력으로 볼 수 있다.

4. 분석 및 결론

인터커넥션 네트워크는 대규모 고성능 컴퓨팅 시스템의 성능을 절대적 영향을 주는 중요 요소이다. 이에 따라 Top 500 목록 내의 슈퍼컴퓨터는 효율적인 인터커넥션 네트워크를 도입하고 있으며, 그 중 최상위에 해당되는 슈퍼컴퓨터는 자체적인 인터커넥션 네트워크 솔루션을 도입하여 시스템의 성능을 극대화하고 있다. Cray 사의 Aries 디바이스, 일본 K 컴퓨터의 ICC, 중국 TaihuLight의 Sunway Interconnect, Tianhe-2의 TH Express-2를 구성하는 NIC, 인텔사의 Omni Path 아키텍처 모두 자체 제작된 인터커넥션 솔루션을 통해 슈퍼컴퓨터의 인터커넥션 네트워크를 지원하고 있다.

인피니밴드 네트워크 또한 대규모 시스템을 구성하는데 있어 유용한 네트워크로 RDMA를 통해 CPU의 간섭 없는 통신이 이루어지며 위와 같은 특징은 다른 네트워크 통신 프로토콜과 달리 높은 통신 대역폭, 빠른 전송 속도, 높은 확장성 등의 장점을 가능하게 한다. 현재 Top 500 목록에서 절반에 가까운 슈퍼컴퓨터가 인피니밴드를 인터커넥션 네트워크로 사용하고 있으며, 상위 순위일수록 그 비율이 높은 경향을 보인다. 이에 반해 기가비트 이더넷은 OSI 계층을 따르는 익숙한 시스템 환경을 장점으로 비용 대비 효율을 중시하는 중형급 데이터 센터에서 선호하고 있으며, 과거에는 인피니밴드 대비 낮은 속도를 보이는 단점이 있었으나 최근에는 40/100Gbps 기가비트 이더넷의 등장으로 속도 측면에서 인피니밴드에 뒤지지 않게 되었다. 지연(latency) 성능이 인피니밴드에 비해 떨어지는 것이 단점이기는 하지만, RoCE 기술을 통

해 RDMA 지원도 가능해져 고성능 컴퓨팅 분야에서 인 피니밴드 다음으로 높은 점유율을 보이며, 앞으로도 인 피니밴드와 경쟁 관계를 유지할 것으로 보인다.

향후 고성능 인터커넥트 분야는 기존의 전기 신호기 반 데이터 통신에서 한 단계 도약하여, 실리콘 포토닉스 [18]와 같이 전기 신호가 아닌 빛으로 데이터를 주고 받 는 인터커넥트 기술이 발전할 것으로 예상된다.

ACKNOWLEDGMENTS

본 논문은 한국과학기술정보연구원에서 2017년도 정 부(미래창조과학부)의 지원(No.K-17-L01-C01-S02, 초 병렬 고집적 컴퓨팅 시스템 기술 연구 개발)으로 수행된 연구임.

REFERENCES

[1] Hennessy, John L, and David A. Patterson. Computer architecture: a quantitative approach. Elsevier, 2011.

[2] Dally, William James, and Brian Patrick Towles. Principles and practices of interconnection networks. Elsevier, 2004.

[3] Top500. <http://www.top500.org/>

[4] Jack Dongarra, "Report on the Sunway TaihuLight System", University of Tennessee. Oak Ridge National Laboratory. June 14, 2016.

[5] Yutong Lu. "Overview of Tianhe-2(MilkyWay-2) Supercomputer," NUDT. 2013.

[6] Dongarra, Jack. "Visit to the National University for Defense Technology Changsha, China," Netlib. 2013.

[7] Alverson, Bob, et al. "Cray XC series network," Cray Inc., White Paper WP-Aries01-1112. 2012.

[8] Kim, John, et al. "Technology-driven, highly-scalable dragonfly topology," ACM SIGARCH Computer Architecture News. Vol. 36. No. 3. IEEE Computer Society, 2008.

[9] Kim, John, William J. Dally, and Dennis Abts. "Flattened butterfly: a cost-efficient topology for high-radix networks," ACM SIGARCH Computer

Architecture News 35.2 (2007): 126-137.

[10] Todd Rimmer, Intel Omni-Path Architect, "Intel Omni-Path Architecture Technology Overview," Aug, 2015.

[11] Takashi Aoki. "Technologies beyond the K computer," Fujitsu, 2012.

[12] Mellanox Technologies Inc. "Introduction to Infiniband," 2014.

[13] Mellanox. "InfiniBand Strengthens Leadership as the Interconnect Of Choice By Providing Best Return on Investment," 2015.

[14] Infiniband Trade Association. "FDR Infiniband Fact Sheet," 2011.

[15] HPC Advisory Concl, Interconnect Analysis: 10GigE and InfiniBand in High Performance Computing, 2009.

[16] Mellanox. "Spectrum Ethernet Switch - Product Brief," 2015.

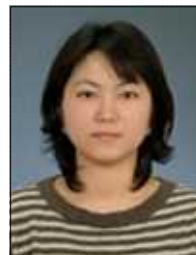
[17] John D'Ambrosia, et al. "40 Gigabit Ethernet and 100 Gigabit Ethernet Technology Overview," Ethernet Alliance, 2010.

[18] IBM's Silicon Photonic Technology, May 12th, 2015, <https://www-03.ibm.com/press/us/en/pressrelease/46839.wss>

저자소개

조혜영(Hyeyoung Cho)

[정회원]



- 2000년 2월 : 부산대학교 전산학과 (이학사)
- 2004년 2월 : 한국과학기술원 컴퓨터공학 석사(공학석사)
- 2014년 3월 - 현재 : 한국과학기술원 전산학부 박사

<관심분야> : High Performance Computing, Cloud computing, Parallel processing, GPGPU, Data analytics
고성능 컴퓨팅, 클라우드 컴퓨팅, 병렬처리, GPGPU, 데이터 분석

전 태 준(Tae Joon Jun)

[정회원]



- 2013년 2월 : 연세대학교 컴퓨터 과학과 (공학사)
- 2015년 2월 : 한국과학기술원 전 산학부 석사 (공학석사)
- 2015년 3월 - 현재 : 한국과학기술원 전산학부 박사

<관심분야> : Biomedical engineering, Data analytics, Cloud computing, GPGPU
의생명 공학, 데이터 분석, 클라우드 컴퓨팅, GPGPU

한 지 용(Jiyong Han)

[정회원]



- 2012년 8월 : 한국항공대학교 정보통신공학과 (공학사)
- 2014년 2월 : 한국항공대학교 정보통신공학과 석사 (공학석사)
- 2014년 3월 - 현재 : 한국과학기술원 전산학부 박사

<관심분야> : Network security, Internet of things, Embedded system, Data analytics
네트워크 보안, 사물 인터넷, 임베디드 시스템, 데이터 분석