

양자인터넷과 양자정보의 초연결성

정갑균
서울대학교

요약

양자정보기술은 크게 양자컴퓨팅, 양자통신, 양자센싱으로 분류되며, 양자인터넷의 실현을 최종목표로 연구개발이 활발히 이루어지고 있다. 양자인터넷은 현재 우리가 널리 사용 중인 인터넷 기술의 단순한 업데이트가 아니며, 양자 얽힘 등 양자정보의 초연결성을 염두에 두고 연구가 이루어지고 있다. 따라서, 본 고에서는 차세대 양자인터넷의 물리적 핵심 요소 및 양자정보학적 전제조건, 그리고 양자정보 초연결성의 의미를 간략히 알아본다.

I. 서론

인터넷(internet)은 21세기 현대 문명에서 가장 중요한 삶의 도구이자 문화적 요소로 자리매김한지도 꽤 오랜 시간이 흘렀다. 1970년대 미국에서 개발된 ARPANET이 인터넷의 기원이며, 현재 우리나라는 정보기술(IT)을 발판으로 인터넷 최강국의 지위를 오랜 시간 동안 굳건히 유지하고 있다.

현재 우리는 디지털 정보기술인 인터넷을 넘어, 양자인터넷(quantum internet)[1][2][3]의 시대를 야심 차게 준비하고 있다. 양자인터넷은 양자정보기술(quantum information technology; QIT[4][5][6])의 초석 위에 놓이며 무한한 가능성을 제공할 것으로 기대되고 있다. 전 세계적으로 양자정보기술은 양자컴퓨팅(quantum computing), 양자통신(quantum communication), 그리고 양자센싱(quantum sensing)의 세 가지 범주로 분류되어 연구되고 있으며 이 세 가지 기술의 최종 산물로써 우리는 양자인터넷을 기대하고 있다고 말할 수 있다. 그렇지만 양자인터넷의 정확한 개념이나 그 활용 가능성은 아직 명확하게 알려진 것이 거의 없는 것이 사실이다.

우선 인터넷과 양자인터넷의 차이점을 간략히 살펴보자. 이 차이는 비트(binary digit; bit)에 기반한 디지털 정보기술과 큐비트(quantum bit; qubit)에 기반한 양자정보기술의 기본단위로부터 쉽게 구별이 가능하다. 그리고 디지털 컴퓨팅과 통신 기술

의 집약체가 인터넷을 형성하였듯이, 양자인터넷의 정의도 (양자센싱을 포함한) 양자컴퓨팅과 양자통신의 고도화된 집약체로 이해할 수 있다. 좀 더 나아가, 디지털 정보기술과 양자정보기술은 전자기학이나 양자역학을 활용한다는 면에서 많은 공통점을 가진다. 두 기술의 분명한 차이는 역시 비트와 큐비트의 차이인데, 양자정보기술의 기본단위인 큐비트는 양자 중첩(quantum superposition) 현상을 허용해야 하며, 이를 넘어 (다중 큐비트 사이에) 양자 얽힘(quantum entanglement) 연산을 반드시 구현할 수 있어야 한다는 것이다. 다시 말해, 양자 중첩과 양자 얽힘을 구현할 수 있는가의 차이가 바로 디지털 정보기술과 양자정보기술을 구별하는 명확한 기준이 된다고 할 수 있다.

기술의 발전은 엄밀한 과학적 근거를 바탕으로 진행되기 때문에, 정보기술과 양자정보기술의 근간을 이루는 이론적 프레임에 잠시나마 살펴 볼 필요가 있다. 디지털 정보기술은 클로드 섀넌(C. E. Shannon)의 정보이론[7]을 바탕으로 하며, 양자정보기술은 존 폰노이만(J. von Neumann)의 양자정보이론(quantum information theory)을 토대로 한다고 말할 수 있다[〈그림 1〉참조]. 근본적으로 두 이론 모두 정보(information)의 정량화에 사용되는 엔트로피(entropy)의 변화를 추적하고 이해하는 수학적 방법론이라고 할 수 있다. 다만 양자정보는 디지털 정보 대비 (양자 얽힘 현상에 따른) 엔트로피의 변화를 예측하는 일이 보다



그림 1. 정보이론과 양자정보이론의 창시자인 섀넌과 폰노이만 (출처: 위키피디아)

복잡하다는 것이다. 뿐만 아니라, 컴퓨팅 등 고전 정보이론의 토대가 새년의 통신이론(communication theory)[7]을 바탕으로 하기 때문에, 양자컴퓨팅이나 양자센싱의 근본적인 속성도 양자 통신이론(quantum communication theory)에서 그 맥락을 찾는 것이 바람직하다고 볼 수 있다. 참고로, 통신이론은 데이터 압축(data compression) 정리와 잡음 채널코딩(noisy channel coding) 정리로 구성되며 이 두 가지 정리가 디지털 정보의 이론적 핵심 요소이며 현재의 디지털 기술을 완성할 수 있었던 견인차 역할을 했다고 말할 수 있다.

잠시 내용을 요약하자면, 탄탄한 정보이론의 토대가 비트 기반의 (디지털) 정보기술의 꽃을 화려하게 피웠으며, 정보기술의 집약체로써 우리는 인터넷이라는 엄청난 편의를 제공받고 있다는 것이다. 디지털 기술의 발전상과 더불어 양자인터넷 기술의 진화도 비슷한 맥락으로 진행된다고 볼 수 있지만, 기술적 난이도를 넘는 수준에서 양자인터넷에 대해 우리가 고민할 부분들이 산적해 있음을 알 수 있다. 첫번째로, 주위 환경의 잡음을 극복하는 양자정보기술을 실현하는 일이 녹록치 않다는 사실이다. 양자정보기술 자체가 원자 단위를 제어하는 세심한 기술이다 보니 여전히 극복할 난관이 산적해 있다. 두번째로, 양자정보이론에서의 미해결 문제인데, 이는 양자통신에서 가장 핵심이 되는 양자 잡음 채널코딩(quantum noisy channel coding) 정리가 아직까지 미완성으로 남아 있다는 것이다. 즉 양자채널의 채널용량(quantum channel capacity)을 정확하게 결정하는 방법론은 여전히 모르고 있다는 사실이다. 세번째로, 인터넷에서의 고전 빅데이터(big-data) 처리의 어려움과 마찬가지로 양자인터넷에서의 양자빅데이터(quantum big-data)에 관한 예측 방법론이 전혀 마련되어 있지 않다는 것이다. 마지막으로, 양자컴퓨팅, 양자통신, 그리고 양자센싱이 보여줄 것으로 예측되는 초고속 연산, 초보안 통신, 그리고 초정밀 계측이 융합된 양자인터넷의 초연결성(hyper-cinnectivity)에 대한 연구가 제대로 진행되고 있지 않다는 사실이다.

본 고에서 우리는, 양자인터넷의 연구개발 방향과 물리적 핵심 요소 기술 및 전제조건을 살펴보고자 한다. 또한 앞 서 언급한 양자인터넷에서 발생할 수 있는 네 가지 근본적인 문제점들을 양자정보의 통신이론적 관점에서 비교적 면밀히 고민해보고 그 해결점에 대한 실마리를 간략히 제시하고자 한다.

II. 양자인터넷의 핵심 요소 및 주요 기능

양자인터넷의 3대 물리적 핵심 요소인 양자광원(quantum photon source), 양자채널(quantum channel), 양자노드

(quantum node)를 살펴보면 다음과 같다[8][9][10]. 우선 고도로 정제된 양자광원이 필요한데, 이는 단일 광원(single photon) 또는 얽힘 광원(entangled photon pair)을 기본적으로 의미한다. 광자를 핵심 요소로 고려하는 이유는, 양자인터넷이나 양자 네트워크(quantum network)는 원거리에서 양자정보를 공유하고 처리하는 방식을 전제로 삼기 때문이다. 나아가 고속의 정보 처리를 위해서는 광자를 매개로 하는 것이 최선책이 된다. 양자채널은 잡음이 있는 환경에서 특정한 양자상태(quantum state)를 다른 양자상태로 변환하는 수학적 함수로 정의되며 유선 광케이블 또는 (레이저 또는 전자기파와 같은) 무선 통신의 물리적 형태로 이해하는 것이 가능하다. 특히 양자채널은 원거리의 사용자 간에 양자 얽힘을 분배하는 역할을 분명하게 수행해야 함으로 양자네트워크에서 가장 중요한 요소 중의 하나라고 간주할 수 있다. 따라서 얽힘 교환이 가능한 정제된 양자중계기(quantum repeater) 개발을 위한 노력이 전 세계적으로 활발히 진행 중이다. 마지막으로 양자노드는 양자컴퓨터, 양자메모리(quantum memory), 양자스위치(quantum switch), 그리고 양자측정장비(quantum measurement device) 등의 물리적 형태가 가능하다.

표 1. 양자인터넷의 전제조건 고찰[9][11]

핵심 요소	주요 내용
양자광원	- 고순도 단일 및 양자얽힘 광원 생성 및 분배 기술
양자채널	- 유무선 양자채널 정제 및 양자중계기 개발 기술 - 다자간 양자얽힘 전송 기술 - 이종 양자정보 간 인터페이스 기술 등
양자노드	- 양자컴퓨터, 양자메모리, 양자측정장비 등의 고도화 - 양자노드 원격 제어 HW/SW 기술 - 양자라우팅 기술 개발 등
양자암호 프리미티브	- 고품위의 원거리 양자키분배 프로토콜의 실현 - 양자네트워크용 보안 솔루션 설계 등
양자정보 컨텐츠	- 양자 얽힘을 전제로 한 다양한 양자정보 콘텐츠 개발 - 양자 빅데이터 처리 및 효율적인 활용을 위한 대안 마련
양자통신이론 정립	- 양자채널용량의 특이성에 대한 문제 해결 및 채널용량의 정량화 - 양자네트워크의 초연결성을 가능할 복잡성 이론 제시

양자광원을 비롯한 물리적 3대 핵심 요소기술 모두 현재까지는 외부 잡음에 매우 취약한 것이 사실이지만 그 기술을 구현하는 다양한 방식이 존재하고 또한 양자정보기술의 진보와 함께 잡음에 대한 문제점들은 극복하는 해결책을 찾을 것으로 예측하고 있다. 예를 들어, 잡음에 대한 양자정보기술의 대안으로 양자 오류 정정(quantum error correction; QEC) 코드 또는 양자 오류 완화(quantum error mitigation; QEM)와 같은 방식이 이

론적 틀을 넘어 실험적으로도 구현하는 연구들이 선보이고 있기 때문이다[12][13].

물리적 한계를 넘어, 양자인터넷이 갖추어야 할 전제조건에 대한 심도 있는 고찰도 절실히 필요한 상황이다(표 1) 참조. 물리적 구현을 위한 연구개발이 우선적으로 중요하지만, 양자인터넷의 보안성 및 양자정보 콘텐츠의 개발도 소홀히 할 수 없는 내용으로 보여진다. 또한 양자채널용량의 특이성을 완벽히 규명하는 이론적 연구는 양자정보기술의 완성이라는 측면에서 가장 중요한 요소이자 양자인터넷의 전제조건이라고 말할 수 있다. 왜냐하면, 양자 얽힘을 통한 양자정보의 전달에서 왜곡이 발생한다면 우리의 최종목표인 양자인터넷이 불완전할 수 있다는 역설을 낳기 때문이다[9][11][14](III 절의 부연 설명 참조). 양자채널용량의 특이성은 정보전달의 왜곡 현상 초래할 뿐만 아니라, 동시에 고전채널 대비 양자채널의 양자정보 전달 능력의 향상이라는 두 가지 모순된 얼굴을 지니고 있기도 하다.

이제는 양자인터넷의 기능적인 측면을 잠시 고찰해 보자. 디지털 인터넷과 마찬가지로 양자인터넷은 원거리에서의 양자 상태 전달(quantum state transfer; QST)을 자유자재로 수행하되 양자 얽힘을 고려한 네트워크를 조건을 삼아야 한다. 양자 상태 전달의 효율적 수행을 위해서는, 양자전송(quantum teleportation), 원격상태준비(remote state preparation; RSP), 및 양자상태공유(quantum state sharing; QSS) 프로토콜 등을 주로 고려할 수 있다. 가장 널리 알려진 양자전송[15]의 경우, 양자인터넷의 효용성이나 활용성을 가장 극명하게 대변하는 양자정보 프리미티브 중의 하나가 된다. 또한 얽힘 기반의 원격상태준비와 양자상태공유 프로토콜 또한 양자네트워크 고유의 성질을 잘 반영할 수 있는 모델이라 여겨진다. 기존 인터넷에서도 원격 제어와 같은 개념이 존재하는 것이 사실이지만, 양자인터넷에서는 양자 얽힘을 기반으로 양자 제어가 이루어 진다는 차별성이 존재한다고 볼 수 있다. 양자상태공유 방법의 경우, 양자인터넷의 보안성 이슈와 면밀히 연결될 수 있는데, 사실 양자상태공유 프로토콜은 양자비밀공유(quantum secret sharing) 프로토콜의 확장된 버전이며 비밀키(private key) 처리를 위한 새로운 패러다임을 제시할 것으로 예상된다.

사실 양자인터넷의 또 다른 특별함은 분산양자컴퓨팅(distributed quantum computing; DQC) 기법에서 발견할 수 있다[16]. 즉 스케일이 큰 완벽한 양자컴퓨터를 확보하지 못한 상황에서도, 적은 수의 완전한 큐비트를 가진 다수의 양자컴퓨터를 네트워크로 구성하여 (원거리에서) 분산된 형태로 고속의 양자정보 처리를 수행하는 일이 가능하기 때문이다. <그림 2>에 제시된 분산양자컴퓨팅 연구개발을 위한 로드맵의 경우, 적은 수의 노드에 대한 확장성의 고도화 및 이중 인터페이스 성능 강

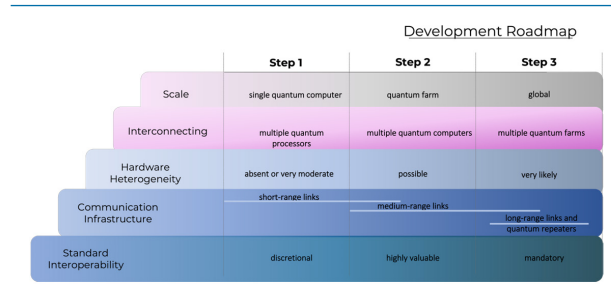


그림 2. 분산양자컴퓨팅 기술개발을 위한 로드맵[15]

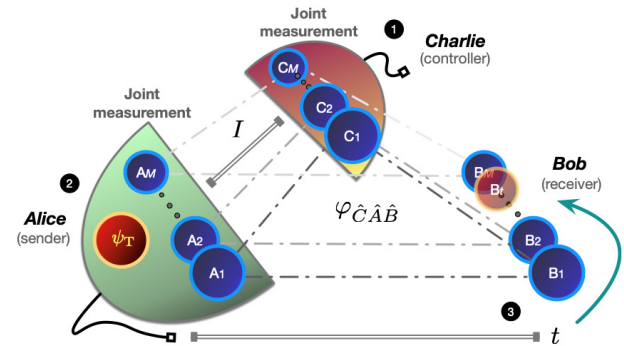


그림 3. 양자네트워크의 원격 제어를 위한, 통제가 있는 포트기반 양자전송 모델의 예시[17]

화를 통한 발전 전략은 사실상 양자네트워크 기술 개발과 맥락을 같이 한다고 볼 수 있다. 그리고 분산형 연산을 위해서는 정제된 양자 얽힘 상태의 분배는 물론 양자상태의 원격 준비/제어가 반드시 가능해야 할 것이다. 이는 양자 상태 전달 항목에서 열거한 프로토콜의 형태로 구현이 가능하다고 판단된다.

고도의 양자 얽힘 속에서 분산양자컴퓨터를 제어하는 다양한 기법들이 있겠지만 예를 들어 포트기반 양자전송(port-based quantum teleportation; PBT)의 개념을 활용할 경우 그 효용성이 배가될 것으로 보인다. 일반 양자전송과는 달리, 포트기반 양자전송은 수신자의 특정 연산을 동반하지 않기 때문에 원격의 양자상태를 양자 연산에서 필요로 하는 방식대로 손쉽게 재배열 또는 처리가 가능할 것으로 예측된다(<그림 3> 참조).

양자인터넷은 물리적 3대 핵심 요소뿐만 아니라, 고려해야 할 이론적 전제조건도 상당히 까다로우며 기능적인 측면에서도 다양성이 요구될 것으로 보인다. 다음 절에서는 얽힘 기반 양자정보의 초연결성의 의미와 복잡성 이론(complexity theory), 그리고 양자 빅데이터에 대한 논의를 간략히 조망해 보고자 한다.

III. 양자정보의 특이성과 초연결성

디지털 정보이론과는 달리, 양자정보이론은 여전히 양자 잡

음 채널코딩 정리에 대한 완성된 결론을 얻고 있지 못하고 있다. (디지털 정보이론에서는 두 고전채널의 채널용량에 대한 덧셈이 항상 성립한다.) 즉 양자 얽힘을 활용하여 양자정보를 인코딩할 경우에, 양자채널의 채널용량에 대한 특이성 또는 초과산성(super-additivity)이라고 불리는 믿기 힘든 이론적 결론에 도달하며 이에 대한 해결책을 여전히 찾지 못하고 있다[9][14]. 다시 말해, 다중 양자채널로 전송되는 양자정보의 값을 정량화(양자채널용량)하는 이론적 방법을 알지 못한다는 것[18]인데, 본질적으로 양자 얽힘에 대한 명확한 이해가 여전히 결여되어 있다는 말로 재해석이 가능하다. <그림 4>는 양자채널의 고전용량(classical capacity)에 관한 초과산성의 예를 보여주고 있다. (양자채널의 채널용량은 고전채널과는 달리 전송하고자 하는 정보의 종류에 따라, 고전용량 / 양자용량(quantum capacity) / 비밀용량(private capacity) / 포텐셜용량(potential capacity) 등 다양한 형태로 정의하는 것이 가능하다.) 이는 개별 양자정보 기술 그 자체뿐 아니라 우리가 최종목표로 삼고 있는 양자네트워크나 양자인터넷에서도 심각한 문제를 초래할 수 있다는 사실을 어렵지 않게 예측할 수 있다.

고전정보와 대비되는 양자정보의 또 다른 특이성에 대한 예를 살펴볼 필요가 있다. 양자정보의 측도 집약화(concentration of measure)라 불리는 이 현상은 양자정보과학의 이론적 핵심 요소인 동시에 양자 빅데이터를 이해하는 출발점이라고 볼 수 있다. 즉 고차원의 양자정보 또는 방대한 양의 양자정보를 취급하는 경우에는, 측도 집약화 현상을 통한 양자정보의 해석이 올바른 접근 방식이기 때문이다. 기하학적 형태 측면에서 살펴보면, 비트 기반의 빅데이터는 하이퍼 큐브(hyper-cube)의 구조를 갖지만, 이에 반해 큐비트 기반의 양자 빅데이터는 하이퍼 구체(hyper-sphere)의 구조를 지니게 된다. (양자정보의 집합은 차원에 상관없이 행렬의 대각합이 1이 된다는 수학적 조건에 따라 항상 구체를 형성한다.) 이런 구조적 차이 또한 고전정보와 양자정보의 극명한 차이점이라고 말할 수 있으며 정보처리를 위한 방법론을 달리 해야함을 의미한다. 이미 우리는 양자정보의 측도 집약화 현상을 통해, 양자 얽힘의 근본적 속성[19], 양자 통계학의 재해석[20], 및 비밀양자채널의 설계[21] 등에 관한 결과를 확인할 수 있다. 또한 최근에는 이 현상을 활용하여 잡음선형문제(noisy linear problem) 또는 양자내성암호(post-quantum cryptography)의 풀이에 대한, 양자기계 학습(quantum machine learning)의 효율성 또는 양자 이득(quantum advantage)을 실현하는 최신 연구결과도 확인해 볼 수 있다[22].

앞 선 논문[19][20][21]에서 확인할 수 있는 것처럼, 양자인터넷은 근본적으로 (효율적인) 양자 빅데이터 처리를 염두에 두고

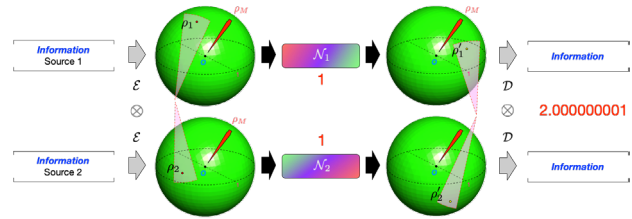


그림 4. 양자채널용량의 초과산성에 관한 예시[14]. 채널용량이 각각 1인 두 개의 양자채널로 (양자 얽힘으로 인코딩한 정보를) 보낸 양자채널용량의 합이 2를 초과함.

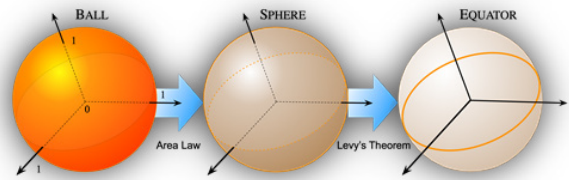


그림 5. 양자정보의 측도 집약화 현상: 고차원 혹은 양자 빅데이터는 정보가 구체에서 임의의 적도 부분으로 응축된다는 사실을 보여줌

있으며, 이를 위한 최선의 연구 방법론이 양자정보의 측도 집약화 현상을 이해하는 것에서 출발해야 하는 데에는 아무런 이견이 없을 것으로 여겨진다.

<그림 5>는 양자정보의 측도 집약화 현상을 좀 더 보기 쉽게 도식화한 것으로, 이론물리학에서 예측하는 것처럼 면적 법칙(area law 또는 holographic principle)을 따르게 된다. 물리학에서 예측하는 면적 법칙의 근본적인 의미는, 블랙홀(blackhole) 또는 다입체 체계(many-body) 시스템과 같은 고차원 양자상태의 경우 구체(ball)가 아닌 구각(sphere)에 모든 양자정보가 수렴한다는 것이고, 이는 구각의 정보에 대한 정밀한 해석 만으로도 블랙홀 또는 다입체 체계를 이해할 수 있다는 결론을 내릴 수 있게 한다. 나아가 고차원 양자정보 및 양자 빅데이터 역시 레비의 정리(Levy's theorem) 또는 측도 집약화 현상을 일반적으로 따르게 되는데, 전술한 바와 같이 양자인터넷에서의 양자정보를 이해하는 수학적 핵심 도구가 될 것으로 예측된다. 면적 법칙에 비해, 양자정보이론에서 고려하는 양자상태의 측도 집약화 현상은 그 수렴성의 정도가 보다 강력하다는 사실(구각에서 적도 근방으로의 정보 응축 현상)이다.

마지막으로 양자정보의 초연결성 문제를 양자 복잡도 관점에서 정의하고 이해하는 시도가 필요해 보인다. 기존 인터넷과 마찬가지로, 구조적인 측면에서 양자네트워크 또는 양자인터넷도 매우 복잡한 연결성을 가질 것으로 예상된다. 하지만 본질적인 차이점이 존재할 가능성이 농후하며 이 또한 양자정보기술

의 핵심 요소인 양자 얽힘과 필연적으로 연관될 것이다. 기존 인터넷의 경우, 조합론적 방법을 통해 네트워크의 복잡성을 이해하려는 시도가 종종 있지만 양자인터넷의 경우에는 현재까지 양자 복잡도를 분석하는 정확한 내용을 확인 또는 예측하기가 매우 어려운 상황이라고 말할 수 있다. 다만 추상적인 양자인터넷의 개념 안에서도 우리가 유추해 볼 수 있는 사안은 있는데, 정적인 상태의 얽힘 분배를 포함하여, 동적인 상태의 얽힘 분배/저장/처리 등의 과정을 사고 실험을 통해 일부라도 상정해 볼 여지는 분명히 있다는 점이다. 뿐만 아니라, 양자 그래프(quantum graph)의 연결성[23]에 관한 선행연구 결과를 토대로, 적은 수의 노드 연결에서 복잡한 연결을 갖는 다중 노드로의 확장을 꾀하는 연구는 양자인터넷의 활용성 측면에서 가치가 매우 높을 것으로 판단된다. 또한 얽힘 광자로 분배된 양자인터넷의 비고전성(non-classicality)에 관한 측도의 연구개발도 중요한 사안 중의 하나라고 판단된다.

본 절에서 우리는, 양자정보의 특이성에 관한 두 가지 심도 있는 관점(양자채널용량 및 양자상태의 측도 집약화 현상)을 살펴 보았고 이를 통해 양자 빅데이터 처리를 위한 아이디어를 논의 하였다. 더불어 양자인터넷의 복잡성을 양자 그래프 관점에서 이해할 필요성도 간략히 소개하였다.

IV. 결 론

본 고에서는 양자네트워크 또는 양자인터넷에 필요한 핵심 요소 기술 및 이론적 고려 사항들을 살펴보았다. 양자네트워크 구축을 위한 양자광원, 양자채널, 그리고 양자노드라는 물리적 3대 핵심 요소들을 둘러보았고 외부 잡음으로부터 양자정보를 궁극적으로 보호하는 전략(양자 오류 정정 등)에 대해서도 논의를 하였다. 또한 이론적 관점에서, 양자보안통신과 양자정보 콘텐츠의 구상 및 양자채널용량 문제의 이해 및 초가산성 해결을 위한 노력의 중요성도 강조하였다.

보다 근본적인 측면에서 우리는 양자인터넷을 이해할 필요가 있기에, 양자정보의 측도 집약화 현상과 양자네트워크의 연결성에 대한 심도있는 고민의 필요성도 간략히 기술하였다. 이는 곧 양자인터넷의 양자 빅데이터 처리를 위한 최초의 발걸음으로 작용할 것으로 예상되기 때문이다.

양자 얽힘으로 연결(초연결성)되고 초고속 연산 및 초정밀 계측이 가능한 초신뢰의 양자통신 네트워크를 우리는 비로소 양자인터넷이라고 명명할 수 있을 것이다. 즉 양자컴퓨팅, 양자통신, 그리고 양자센싱으로 분류된 양자정보기술의 고도화를 넘어, 세 가지 양자정보기술을 하나로 통합하는 협동심에서 양자인터넷

은 더욱 성숙될 것이라고 예상된다. 현재 우리는 양자인터넷의 실현을 위한 우리의 탐구 노력과 먼 미래를 보는 진정한 혜안이 그 어느 때보다 절실히 필요한 시대를 살아간다고 여겨진다.

Acknowledgement

본 연구는 한국연구재단(NRF-2022M3H3A1098237, NRF-2021R1I1A1A01042199)과 정보통신기획평가원(IITP-2019-0-00003) 및 한국과학기술정보연구원(KISTI)의 연구비 지원사업에 의해 수행되었음.

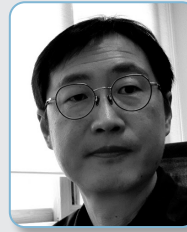
참 고 문 헌

- [1] Kimble H. J. "The Quantum Internet," Nature, 453, pp. 1023-1030 (2008)
- [2] Pirandola S. and Braunstein S. L. "Physics: Unite to Build a Quantum Internet," Nature, 532, pp. 169-171 (2016)
- [3] Wehner S., Elkouss D., and Hanson R. "Quantum Internet: A Vision for the Road Ahead," Science, 362, eaam9288 (2018)
- [4] 이방래, 임종연, 원동규. "미래 산업의 게임 체인저, 양자정보과학기술(QIST): 양자 2.0의 시대," 한국과학기술정보연구원, KISTI Issue Brief 제44호 (2022)
- [5] 유형정. "양자정보기술," 한국과학기술기획평가원, KISTEP 브리프 제21호, 기술동향 (2020)
- [6] 정보통신기획평가원, "ICT R&D 기술로드맵 2025: ICT 디바이스," (2020)
- [7] Shannon C. E. "A mathematical theory of communication," Bell System Technical Journal, 27, pp. 379-423 (1948)
- [8] Cacciapuoti A. S., Caleffi M., Tafuri F. et al. "Quantum Internet: Networking Challenges in Distributed Quantum Computing," IEEE Network, 34, pp. 137-143 (2020)
- [9] 정갑균. "차세대 양자인터넷 구축을 위한 연구개발 동향," 정보통신기획평가원(IITP), 주간기술동향, 기획시리즈: 양자기술, 2086호, pp. 2-12 (2023)
- [10] 배준우. "양자 인터넷의 이해," 한국지능정보사회진흥원, AI

Network 인사이드 제2호 (2022)

- [11] 정갑균. “양자인터넷에서의 보안, 그리고 사이버 수사의 딜레마,” 치안과학기술리뷰 제4호, pp. 59-64 (2023)
- [12] Endo, S., Benjamin, S. C., and Li, Y. “Practical quantum error mitigation for near-future applications,” Physcal Review X, 8, 031027 (2018)
- [13] Kim, Y., Eddins, A., Anand, S. et al. “Evidence for the utility of quantum computing before fault tolerance,” Nature, 618, pp. 500-505 (2023)
- [14] 정갑균, 이진형. “양자정보기술의 핵심, 양자얽힘의 양자 정보학적 해석,” 한국과학기술단체총연합회, 과학과 기술, KOFST Special Features, 632, pp. 36-39 (2022)
- [15] Bennett C. H., Brassard G., Crépeau C. et al. “Teleporting an Unknown Quantum State via Dual Classical and Einstein-Podolsky-Rosen Channels,” Physical Review Letters, 70, pp. 1895-1899 (1993)
- [16] Caleffi M., Amoretti M., Ferrari D. et al. “Distributed Quantum Computing: a Survey,” arXiv: 2212.10609 (<https://arxiv.org/abs/2212.10609>)
- [17] 이수준, 정갑균. “포트 기반 통제 양자 전송 시스템 및 방법,” 대한민국 특허, (등록번호) 10-2381049 (2022)
- [18] Bennett C. H. and Shor P. W. “Quantum Channel Capacities,” Science, 303, pp. 1784-1787 (2004)
- [19] Hayden P., Leung D. W., and Winter A. “Aspects of Generic Entanglement,” Communications on Mathematical Physics, 265, pp. 95-117 (2006)
- [20] Popescu S., Short A. J., and Winter A. “Entanglement and the foundation of statistical mechanics,” Nature Physics, 2, pp. 754-758 (2006)
- [21] Hayden P., Leung D., Shor P. W., and Winter A. “Randomizing Quantum States: Constructions and Applications,” Communications on Mathematical Physics, 250, pp. 371-391 (2004)
- [22] Jeong K. “Sample-size-reduction of quantum states for the noisy linear problem,” Annals of Physics, 449, 169215 (2023)
- [23] Chávez-Domínguez J. A. and Swift A. T. “Connectivity for quantum graphs,” Linear Algebra and its Applications, 608, pp. 37-53 (2021)

약 력



정 갑 균

2002년 고려대학교 이학사
 2006년 서울대학교 이학석사
 2012년 서울대학교 이학박사
 2012년~2016년 고등과학원 계산과학부 연구원
 2016년~2017년 서울대학교 물리천문학부 연구원
 2016년~현재 고등과학원 계산과학부 부멤버
 2018년~2019년 서울대학교 산업수학센터 연구원/
 선임연구원
 2019년~2022년 서울대학교 수학연구소 선임연구원
 2022년~현재 서울대학교 수학연구소 책임연구원
 2022년~현재 사단법인 한국양자정보학회 감사
 관심분야: 양자정보이론, 양자채널용량, 양자전송,
 양자기계학습, 양자네트워크