

1. 서론

양자정보기술을 위해서 광자를 사용할 때 얻는 장점은 비교적 쉽게 각 단위 양자상태를 제어하고 잡음 없이 멀리 전송할 수 있다는 점이다. 광자 하나하나의 편광, 공간분포, 시간분포, 주파수 등은 고전적인 빛과 마찬가지로 일반적인 광학계를 통해 제어할 수 있다. 이러한 광자의 특성에 양자얽힘(quantum entanglement)을 유도하는 방법도 잘 확립되어 있는데, 비선형광결정 내에서 일어나는 자발매개하향변환(SPDC: spontaneous parametric down-conversion)이나 자발사광파혼합(spontaneous four-wave mixing) 현상이 앞서 말한 모든 물리량들에 대해서 서로 얽힘상태에 있는 광자쌍을 만들어낸다. 특별히 광자의 시간 및 공간모드를 활용

에 각각 인코딩하는 큐디트의 기본적인 원리에 대해 설명한다. 단순히 양자정보의 용량을 늘리는 것에 지나지 않고, 서로 다른 자유도의 얽힘이 동시에 존재하는 초얽힘(hyperentanglement) 상태를 만들어서 일차원적인 양자얽힘만으로는 하기 어려운 보다 발전된 양자정보기술을 구현한 예를 몇 가지 소개한다. 마지막으로 원거리 양자통신과 양자인터페이스에 적용하기 위해서 공간모드 양자상태를 광섬유로 전송한 연구결과를 소개한다. 광자의 고차원 양자상태를 이용한 양자정보기술의 또 하나의 큰 줄기는 빛의 위상공간에서의 양자역학적 분포를 이용한 연속변수(continuous variable) 기반 기술이지만, 본 기사는 필자의 연구분야와 보다 가까운 단일광자의 이산변수(discrete variable) 양자상태에 기반한 기술들만을 다루기로 한다.

특집 ■ 양자정보

단일광자 고차원 양자상태의 활용

박희수*

하는 기술이 근래에 활발히 연구되기 시작했다. 시간/공간모드는 기본적으로 무한차원의 자유도를 가지므로, 각 광자에 많은 양의 양자정보를 부여함으로써 단일광자 광원과 검출기 효율의 제한에도 불구하고 양자정보 시스템의 용량을 늘릴 수 있다. $|0\rangle$ 과 $|1\rangle$ 로 이루어진 양자비트 또는 큐비트(qubit)를 넘어서 수백 차원의 큐디트(QuDit)를 실험적으로 구현하고 양자정보처리와 양자 메트론펠로지에 응용한 예들이 발표되고 있다.

본 기사는 먼저 단일광자의 공간모드와 시간 프로파일

2. 단일광자 고차원 큐디트

다차원의 양자정보를 광자에 부여하기 위해서는 다수의 직교규격(orthonormal) 상태들을 이용해야 한다. 서로 구별되는 시간/공간 모드 하나하나를 $|0\rangle$, $|1\rangle$, $|2\rangle$ 와 같은 상태로 명명하고 광자를 정해진 모드들 사이의 임의의 중첩상태에 있도록 제어하고 측정한다. 이때 각 모드들이 시간적이나 공간적으로 너무 멀리 떨어져 있으면 각 고유상태 사이의 위상이 불안정해져서 양자

* 한국표준과학연구원 양자측정센터

단일광자 고차원 양자상태의 활용

정보에는 부적합하다. 따라서 근축 (paraxial) 영역 이내의 공간모드들 또는 하나의 펄스 내에 빠른 위상변조를 더하는 방식이 사용된다.

그림 1은 공간모드 및 시간 프로파일 활용 방식을 보여준다. 근축광 공간모드는 여러 방법으로 분류할 수 있지만, 양자정보에 가장 널리 쓰여온 것은 광자의 궤도각운동량(OAM: orbital angular momentum)의 고유상태인 라게르-가우시안(L-G: Laguerre-Gaussian) 모드이다. 이 모드들은 반지름 방향 양자수 n 과 궤도 양자수 l 로 구분된다. 이 모드들의 특징은 전파방향에 수직한 단면에서 궤도각이 0에서 2π 로 한 바퀴 회전하는 동안 전기장의 위상이 $2\pi l$ 만큼 변한다는 점이다. 각 모드에 에너지 $\hbar\omega$ 인 광자가 한 개 있으면, 각운동량은 $\pm \hbar l$ 이며, 부호는 위상의 회전 방향에 의해 결정된다. 이러한 각운동량 고유상태를 이용한 양자상태는 자유공간을 전파할 때 공기의 요동에 의한 잡음의 영향을 비교적 덜 받는 것으로 알려져 있다 [1]. 최근에는 L-G 모드보다 베셀-가우시안 (Bessel-Gaussian) 모드를 사용하면 OAM 상태의 잡음에 대한 안정성이 보다 높아진다는 결과도 보고되었다 [2].

그림 1(a)는 L-G 모드들의 형태를 보여준다. 오스트리아 빈 대학 그룹은 최근 이들 모드들을 이용하여 100차원 양자얽힘 실험결과를 발표했다 [3]. 해당 실험은 평면파에 가까운 펄핑 광원으로 주기적 분극반전 된 KTP (PPKTP) 광결정에서 SPDC를 일으켜 광자쌍을 생성한다. 이상적인 경우 반전성 보존(parity conservation)과 각운동량 보존에 의해 두 개의 광자쌍은 같은 L-G 모드에 있으며, 각 L-G 모드들에 광자쌍이 있을 확률들이 모두 중첩된 얽힘상태에 놓이게 된다. 각 광자의 공간모드를 공간광변조기(spatial light modulator)와 단일모

드광섬유를 이용하여 측정하는데, 특히 임의의 두 공간모드의 중첩모드들도 측정한다. 양자수 $0 \leq n \leq 11, -11 \leq l \leq +11$ 에 해당하는 모든 모드에 대해 두 광자 사이의 상관관계(correlation)의 크기를 측정했으며, 두개의 모드를 선택하는 모든 경우에 대해 얽힘에 의한 양자간섭 가시도를 측정하였다. 측정된 수십만 회의 측정결과와 광자쌍 상태의 형태에 대한 몇몇 가정을 바탕으로 최소한 100 개 이상의 모드가 얽혀있음을 밝혔다 [3]. 그림 1(b)는 캐나다 토론토 대학 그룹에 의해 보고된, 시간 프로파일 기반 인코딩 방법의 한 예이다 [4]. 광자의 펄스 폭보다 짧은 시간영역 내에서, 그림처럼 위상뒤집기(phase flip)를 유도하고, 그 형태에 따라 다수의 직교규격 상태를 만든다. 이 방법 역시 원리적으로는 무한차원의 인코딩이 가능하다. 보고된 실험에서는 PPKTP에서의 SPDC에 의해 만들어진 중심파장 780 nm, 펄스폭이 100 ns 정도인 광자들에 대해서, 30 MHz로 동작하는 전광변조기(electrooptic modulator)를 이용하여 양자상태를 인코딩하고 디코딩하였다. 그들의 첫 실험에서는 3차원 상태에 대해서 고전 한계를 넘는 양자역학적 중첩상태의 측정이 가능함을 보였다 [4].

덧붙이자면, 이와 같이 무한차원 시공간 모드를 이용한 양자상태를 활용하고자 할 때, 그 활용성이 높아짐에 따라 만들어진 시스템의 성능을 검증하는 일은 더 어려워진다는 점은 유의해야 한다. 예를 들어 수백차원 얽힘 상태를 만들었을 때 이를 이상적인 상태와 얼마나 가까운지 의심의 여지 없이 증명하는 것은 사실상 불가능하다. 고전적인 측정장비로 얻을 수 있는 정보들로 고차원 양자상태를 구성하려면 그 용량이 비현실적으로 커야 하기 때문인데, 이는 양자정보의 핵심 장점이기도 하다. 따라서 이와 같은 실험들의 초기 결과들은 완성된 검증보다는 부분적인 특성 측정으로 이루어질 수 밖에 없다.

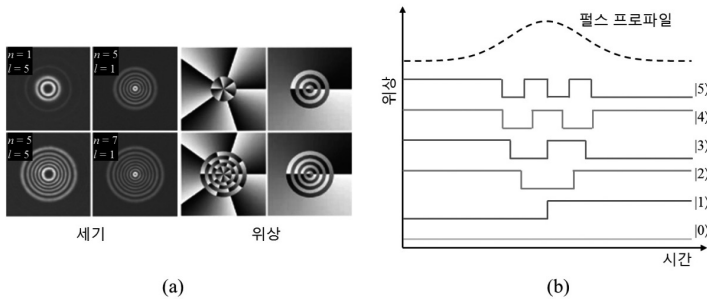
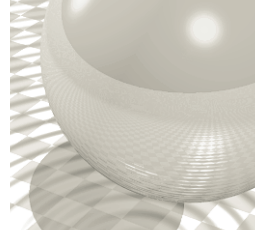


그림 1. 다차원 양자정보를 위한 공간모드와 시간 프로파일 활용예: (a) 라게르-가우시안 모드 (그림출처: 히마차사 홈페이지), (b) 위상변조 큐디트 [4].

3. 초얽힘(hyperentanglement) 상태의 활용

초얽힘(hyperentanglement)이란 광자의 편광, 공간모드, 시간모드 등이 두 광자 사이에 각각 모두 얽혀있는 상



태를 뜻한다 [5]. 초엄힘 상태를 이용하면 자연히 광자 하나가 전송하는 양자정보 용량이 늘어나고, 더 높은 수준의 양자역학적 비국소성을 증명하거나 보다 보안성 높은 양자통신을 가능하게 하기도 한다. 거기에 더해, 한 가지 물리량만 사용할 때는 명확히 보이기 힘든 양자정보 프로토콜을 실현하는데 활용될 수도 있다. 본 절에서는 그러한 예 몇 가지를 소개한다.

그림 2(a)는 초엄힘을 이용한 초압축(superdense) 코딩의 원리를 보여준다. 초압축 코딩이란 1992년에 제안된 양자통신 프로토콜 중 하나로서 [6], 고전적인 광통신과의 명확한 차이를 보여주는 예이다. 광자의 편광에 정보를 인코딩하여 전송하는 경우를 생각해보자. 서로 명확히 구분되는 상태는 수평편광 $|H\rangle = |0\rangle$, 수직편광 $|V\rangle = |1\rangle$ 과 같이 두 가지이므로, 광자 한 개에는 한 개의 비트를 인코딩할 수 있다. 그런데 정보를 보내는 자와 받는 자가 편광엄힘상태(ex. $|HH\rangle + |VV\rangle$) 광자쌍 중 한 개씩을 미리 나누어 갖고, 보내는 자가 자신의 광자의 편광을 변조하여 보내는 경우에, 총 네 가지의 변환($H, V \rightarrow (H, V), (H, -V), (V, H), (V, -H)$)에 의해 서로 구별되는 네 가지의 광자쌍 엄힘상태(벨 상태)를 만든다. 받는 쪽에서 이 네 상태를 구분하는 측정을 한다면, 결국 큐비트 한 개를 갖는 광자 한 개를 전송함으로써 $|0\rangle$ 부터 $|3\rangle$ 까지 총 2 비트의 정보를 전달할 수 있다. 그런데 실제 광자를 가지고 초압축 코딩을 구현할 때에는 네 개의 벨 상태들을 명확히 구분하는 효율적인 측정방법이 없다는 난점이 있었다. 이를 극복하는 방법으로 공간모드 큐비트를 보조(ancillary) 큐비트로 활용하는 방법이 있다. 편광과 공간모드가 초엄힘상태에 있는 광자쌍을 사용하면, 공간모드를 정보전달에 관여시키지 않더라도 최종 광자쌍 측정단계에서 네 개의 편광 엄힘상태를 완벽히 구분하

는 측정이 가능해진다 [7].

그림 2(b)는 초엄힘 시간-빈(time-bin) 상태를 이용한 고속 양자키분배(QKD: quantum key distribution) 기술의 개요이다. 일반적인 양자암호통신에서는 하나의 광자 큐비트가 정보전달 매개체이면서 동시에 보안성 유지의 역할도 맡는다. 따라서 모든 큐비트의 양자상태 순수도(purity)가 중요하며, 단일 광자의 생성 및 검출율이 곧 양자정보의 전송용량이 된다. 그러나 제안된 방식에서는 편광 큐비트만이 보안성 유지를 맡고, 시간-빈 상태는 고전적인 정보만을 전달하는 방법으로 하나의 광자가 고차원의 양자키를 전송하는 QKD를 실현한다. SPDC에 의해 시간-빈 엄힘상태인 광자쌍을 만들어 키를 보내는 쪽과 받는 쪽에서 나눠 갖는다. 각 광자를 수백~수천 개의 시간-빈에 대해 측정하는 데, 이상적인 경우 양쪽은 항상 같은 시간-빈에서 광자를 측정하며 측정된 시간-빈의 위치가 서로 공유하는 키가 된다. 이때 두 광자의 편광이 엄힘 상태에 있어서, 편광 벨 상태 측정을 통해 도청자가 있는지 여부를 판별할 수 있다. 예를 들어 1024 개의 시간-빈을 사용하면 광자 당 10비트의 키를 전송할 수 있다. 보고된 실험에서는, 대략 광자 당 11비트의 정보를 오류보정(error correction) 후 0.5 MHz 정도의 속도로 전송하였다 [8].

그림 2(c)는 초엄힘보다는 혼성엄힘(hybrid entanglement)이라는 명칭을 적용할 수 있는 예이다. 광자의 편광과 고차 L-G 모드 사이의 엄힘을 이용하여 좌표계의 미세한 회전을 L-G 모드의 차수 l 만큼 증폭된 편광 축의 회전으로 측정할 수 있다 [9]. 광자의 수직인 두 편광모드를 서로 회전방향이 반대인 두 개의 L-G 모드로 변환시키는 q-판이라는 소자를 이용하여, 편광-공간모드 혼성엄힘상태의 광자쌍을 만들었

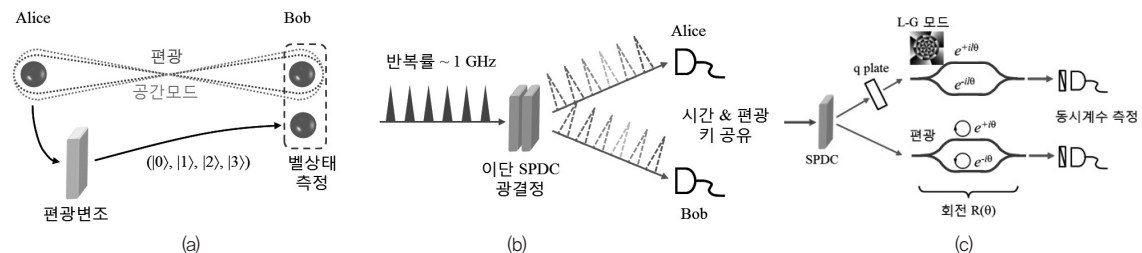


그림 2. 편광-공간모드 초엄힘상태의 이용 예. (a) 초압축 코딩 [7], (b) 편광엄힘을 보안성 척도로 하는 고차원 시간-빈 양자키분배 [8], (c) 편광-각운동량 혼성엄힘 [9].

단일광자 고차원 양자상태의 활용

다. 좌표계를 θ 만큼 회전했을 때 두 L-G 모드 사이의 위상은 $2/\theta$ 만큼 변하므로, 얽힘상태에 있는 광자를 동시계수로 측정하면 편광이 이 위상차만큼 회전한다. 이러한 L-G 모드 간섭계의 '광자편광기어 (photon polarization gear)' 효과는 사실상 고전광학으로도 실현된다. 그러나 그 아이디어는 NOON 상태라 불리는 얽힘을 이용한 양자 메트로로지로부터 출발한 것으로, 소위 양자역학에 영감을 받은 (quantum-inspired) 기술 중의 하나로 볼 수 있다.

4. 공간모드 양자상태의 광섬유전송

여러 개의 공간모드로 이루어진 고차원 상태를 광섬유로 전송하려면 여러 개의 모드가 코어로 전파할 수 있는 다중모드 광섬유를 사용한다. 최근 고전적인 광통신 분야에서 복수의 OAM 모드들을 하나의 광섬유로 전파하는 공간분할다중화(space division multiplexing)에 대한 연구결과들이 보고되었는데 [10], 여기에 사용되는 광섬유는 양자통신에도 활용할 수 있다. 그러나 아직까지 다중 공간모드의 광섬유 전송을 양자정보처리에 응용한 예는 많지 않다. 가장 큰 이유로 생각되는 것은 고전 광통신과 달리 양자통신이 각 모드 사이의 임의의 중첩상태 측정을 필요로 한다는 점이다.

그림 3은 다중 공간모드 양자상태를 광섬유로 전송한 예를 보여준다. 필자가 알기에 최초로 보고된 연구는 네덜란드 라이덴 대학 그룹의 실험이다(그림3(a)). SPDC에 의해 공간모드 얽힘상태 광자쌍을 만들고 이 중 하나의 광자를 자유공간을 전파하는 상황에 가깝도록 만들어진 중공광자결정 광섬유(hollow-core photonic crystal fiber)에 입사시켜 30 cm를 전파한 후 다시 자유공간으로 보내었다. 이후 회전 가능한 위상판(phase plate)과 단일모드 광섬유로 공간모드를 측정하였다. 이를 통해 벨 부등식의 위배를 보였다 [11].

한국표준과학연구원에서는 KAIST와의 공동연구를 통해

공간모드 얽힘상태의 두 광자를 각각 별개의 이중모드 광섬유로 전파시키고, 임의의 공간모드 중첩상태를 효율 높은 광섬유 음향광학소자로 측정된 실험결과를 발표했다(그림 3(b)). 기존 라이덴 대학 그룹의 방식이 $\cos \theta |0\rangle + \sin \theta |1\rangle$ (θ 는 실수) 형태의 큐비트만 측정할 수 있는데 반해 음향광학소자는 임의의 상태를 측정하고 나아가 양자상태단층분석(quantum state tomography)에 적용할 수 있음을 보였다 [12]. 최근에는 중앙대, KAIST와 함께 광섬유 음향광학소자가 임의의 공간모드의 결합에 적용될 수 있으며, 상용 사중모드 광섬유(four-mode fiber, OFS)의 고차모드들을 기본모드로부터 만들 수 있음을 보였다 [13]. 그림 3(c)는 사중모드 광섬유의 각 모드에 대해 측정된 원거리장(far field) 패턴이다. 앞으로 음향광학소자나 공간광변조기 등을 이용한 효율적인 모드분석기 기술이 더욱 발전되면 광섬유 전송에 관한 기술적 어려움도 해결될 것으로 기대된다.

5. 결론

단일광자의 공간모드를 활용한 연구결과들을 중심으로 고차원 양자상태 전송과 관련된 최근의 연구를 정리해 보았다. 고차 OAM 모드를 위시해서 여러 시간/공간 모드를 이용하여 보다 높은 차원의 양자상태를 이용한 대용량 양자정보처리를 수행하려는 연구는 당분간 계속될 것으로 예상된다. 이상적인 주분형 단일광자 광원이 존재하지 않고 상용 단일광자 검출기의 반복률이 MHz 대역에 도달하기 힘든 점을 고려하면, 광자 한 개

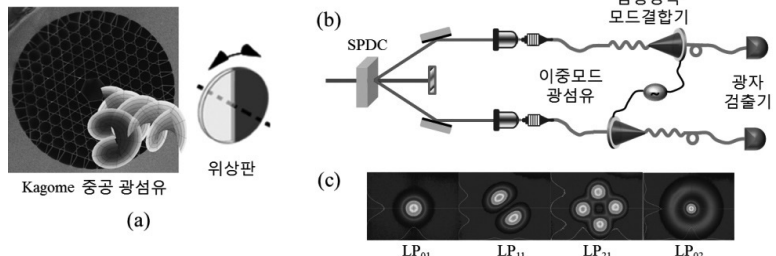
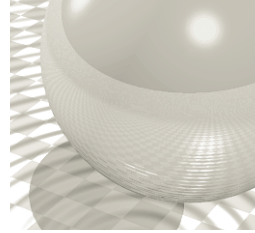


그림 3. 광섬유를 이용한 공간모드 전송. (a) 중공광섬유 [11] (그림출처: 라이덴 대학 홈페이지), (b) 광섬유 공간모드 사이의 얽힘상태 측정 [12], (c) 사중모드 광섬유의 LP 모드 세기분포 [13].



당 전송되는 양자정보를 늘리는 연구는 실용적으로 중요한 의미를 갖는다. 또한 보다 높은 수준의 보안성을 제공함으로써, 양자통신 시스템 각 부품의 불완전성을 이용한 해킹의 가능성을 줄일 수도 있을 것이다.

편광과 시간/공간 모드의 초업힘 상태를 활용하면, 이론적인 제안은 있었으나 현실적으로 구현되기 힘들었던 양자 알고리즘들을 수행할 수 있다. 공간모드를 큐디트로 이용하는 경우에, 양자정보 용량이 늘어나는 만큼 많은 광소자를 필요로 해서 자원효율성이 좋지 않은 경우가 있음은 유의해야 한다. 그럼에도 불구하고 고전적으로 가능하지 않았던 현상들을 실현함으로써 새로운 아이디어에 대한 영감을 줄 수 있는 기초연구로서의 의의는 높다고 생각된다.

참고문헌

- [1] B.-J. Pors, C. H. Monken, E. R. Eliel, and J. P. Woerdman, "Transport of orbital-angular-momentum entanglement through a turbulent atmosphere," *Opt. Express* 19, 6671-6683 (2011).
- [2] M. McLaren, T. Mhalanga, M. J. Padgett, F. S. Roux, and A. Forbes, "Self-healing of quantum entanglement after an obstruction," *Nat. Commun.* 5, 3248 (2014).
- [3] M. Krenn, M. Huber, R. Fickler, R. Lapkiewicz, S. Ramelow, and A. Zeilinger, "Generation and confirmation of a (100 x 100)-dimensional entangled quantum system," *P. Natl. Acad. Sci. USA*, early online publication, doi: 10.1073/pnas.1402365111 (2014).
- [4] X. Xing, A. Feizpour, A. Hayat, and A. M. Steinberg, "Experimental demonstration of a time-domain multidimensional quantum channel," *arXiv:1308.5452 [quant-ph]* (2013); A. Hayat, X. Xing, A. Feizpour, and A. M. Steinberg, "Multidimensional quantum information based on single-photon temporal wavepackets," *Opt. Express* 20, 29174-29184 (2012).
- [5] P. G. Kwiat, "Hyper-entangled state," *J. Mod. Opt.* 44, 2173-2184 (1997).
- [6] C. H. Bennett and S. J. Wiesner, "Communication via one- and two-particle operators on Einstein-Podolsky-Rosen states," *Phys. Rev. Lett.* 69, 2881-2884 (1992).
- [7] J. T. Barreiro, T.-C. Wei, and P. G. Kwiat, "Beating the channel capacity limit for linear photonic superdense coding," *Nat. Phys.* 4, 282-286 (2008); S. P. Walborn, "Hyperentanglement: Breaking the communication barrier," *Nat. Phys.* 4, 268-269 (2008).
- [8] D. J. Gauthier, C. F. Wildfeuer, H. Guilbert, M. Stipčević, B. Christensen, D. Kumor, P. G. Kwiat, K. McCusker, T. Brougham, and S. M. Barnett, "Quantum key distribution using hyperentangled time-bin states," in the Rochester Conference on Coherence and Quantum Optics X, paper W2A (2013).
- [9] V. D'Ambrosio, N. Spagnolo, L. D. Re, S. Slussarenko, Y. Li, L. C. Kwek, L. Marrucci, S. P. Walborn, L. Aolita, and F. Sciarrino, "Photonic polarization gears for ultra-sensitive angular measurements," *Nat. Commun.* 4, 2432 (2013).
- [10] N. Bozinovic, Y. Yue, Y. Ren, M. Tur, P. Kristensen, H. Huang, A. E. Willner, and S. Ramachandran, "Terabit-scale orbital angular momentum mode division multiplexing in fibers," *Science* 340, 1545-1548 (2013).
- [11] W. Löffler, T. G. Euser, E. R. Eliel, M. Scharrer, P. St. J. Russel, and J. P. Woerdman, "Fiber transport of spatially entangled photons," *Phys. Rev. Lett.* 106, 240505 (2011).
- [12] Y. Kang, J. Ko, S. M. Lee, S. M. Lee, S.-K. Choi, B. Y. Kim, and H. S. Park, "Measurement of the entanglement between photonic spatial modes in optical fibers," *Phys. Rev. Lett.* 109, 020502 (2012).
- [13] D.-R. Song, H. S. Park, B. Y. Kim, and K. Y. Song, "Acousto-optic excitation of all the higher-order modes in a four-mode fiber for mode-division multiplexed transmission," in *Optoelectronics and Communications Conference* (2014).

약력



박희수

- 2004년 12월 - 현재
한국표준과학연구원 양자측정센터, 책임연구원
- 2011년 12월 ~ 2012년 12월
University of Illinois at Urbana-Champaign,
Department of Physics, Visiting Scholar
- 2002년 3월 - 2004년 11월
한국과학기술원 물리학과, 박사후연구원
- 2003년 3월 - 2004년 5월
University of Strathclyde (UK), Department of
Electronic & Electrical Engineering, Visiting
Scholar
- 1991년 3월 - 2002년 2월
한국과학기술원 물리학과, 이학사, 이학석사, 이학
박사