

나노역학계 셔틀 시스템에 의해 구현된 양자 얽힘

박희철*
국립부경대학교 물리학과 교수

Quantum Entanglement generated by Nanomechanical Shuttle

Hee Chul Park*
Professor, Department of Physics, Pukyong National University

요약 본 연구의 기본 모델은 두 개의 벌크 초전도체 사이에서 역학적인 진동을 겪는 나노미터 크기의 쿠퍼 쌍 상자 큐비트로 구성된 나노역학적 셔틀 시스템입니다. 두 벌크 초전도체에 바이어스 전압을 가하면 쿠퍼 쌍과 나노역학적 셔틀 사이에 양자 얽힘 상태가 생성될 수 있습니다. 이는 큐비트 상태와 슈뢰딩거의 고양이 상태(Schrödinger's cat state), 즉 나노역학적 진동자의 복잡한 결합 상태의 중첩으로 표현됩니다. 우리는 해당 상태들의 형성과 진화를 대응하는 위그너 함수(Wigner function)를 이용하여 분석할 수 있습니다. 본 연구는 양자 얽힘을 활용한 양자 네트워크 연구의 발전에 기여할 것입니다. 양자 네트워크를 통한 보안이 강화된 사물인터넷을 구현할 수 있는 양자 얽힘 네트워크(Quantum Entangled Network, QEN)에 대한 연구로 발전될 것을 기대할 수 있습니다.

주제어 : 양자 얽힘, 나노전기역학 시스템, 양자 얽힘 네트워크, 양자 얽힘 사물인터넷

Abstract We investigate a nanomechanical shuttle composed of a Cooper pair box qubit undergoing nanomechanical vibrations between two bulk superconductors. Our findings reveal that applying a bias voltage to the superconductors can generate entangled states, represented by a superposition of the qubit states and Schrodinger's cat states i.e., a combination of coherent states of the nanomechanical oscillator. We analyze the formation and evolution of these states using the corresponding Wigner function. This study is expected to contribute to the development of quantum network research using quantum entanglement. We also expect to develop the quantum entangled network (QEN) as the internet of things (IOT) enhanced by quantum security.

Key Words : Quantum Entanglement, Nanoelectromechanical Systems(NEMS), Quantum Entangled Network(QEN), Quantum Entangled Internet of Things(QuEIT)

1. 서론

전기/전자계와 역학계 사이의 변환 현상은 증시계 물리 스케일에서 독특한 특성을 나타냅니다. 나노미터 길이 스케일에서는 양자역학과 쿨롱 상호작용이 중요한 역할을 하며, 이를 통해 새로운 물리적인 특성과 기능이 도입됩니다. 역학적인 움직임과 결합된 포논-도움 터널링

(phonon-assisted tunneling) [1-6], 교류 정류 (rectification of alternating current) [7-9], 단일 전자의 기계적 수송(mechanical transport of single electrons) [10]과 같은 현상을 보여줍니다. 나노전자역학(nanoelectromechanical systems, NEMS) 소자는 전자 수송을 통해 기계적 시스템을 보다 정밀하게 제어할 수 있으며, 이러한 특성은 기저 상태 냉각(ground-state

이 논문은 부경대학교 자율창의기술연구비(2023년)에 의하여 연구되었음.

*교신저자 : 박희철(hcpark@pknu.ac.kr)

접수일: 2025년 01월 30일 수정일: 2025년 02월 14일 심사완료일: 2025년 02월 25일

cooling) [11, 12] 및 셔틀 불안정성(shuttle instability) [4, 13]과 같은 현상에서 그 예를 찾을 수 있습니다.

초전도 현상은 NEMS 소자에 정성적으로 새로운 물리적 특성을 부여합니다. 예를 들어, 쿠퍼 쌍(Cooper pairs)의 기계적 수송은 초전도 전류를 가능하게 하고, 멀리 떨어진 초전도체들 사이에 조셉슨 결합(Josephson coupling)을 형성할 수 있습니다 [14-16]. 이는 NEMS의 나노역학적 성능이 초전도 회로의 결맞음 동역학에 의해 어떤 영향을 받는지에 대한 흥미로운 질문을 제기합니다. 초전도 큐비트 상태와 역학적 여기 상태(mechanical excitations) 간의 상호작용은 양자 통신 분야에서 중요한 연구 주제입니다 [17-22]. 최근 연구에 따르면, 초전도 큐비트는 개별 포논(phonon)의 제어 및 검출이 가능하며, 이를 통해 0-포논 및 1-포논 폭 상태(Fock states)의 비고전적 중첩(superposition)을 생성하고 측정할 수 있음을 보여주었습니다 [21, 22]. 이러한 수준의 제어는 포논을 매개로 한 양자 상태 전이(quantum state transfer)와 원격 큐비트 간 양자 얽힘(quantum entanglement) 형성을 가능하게 합니다.

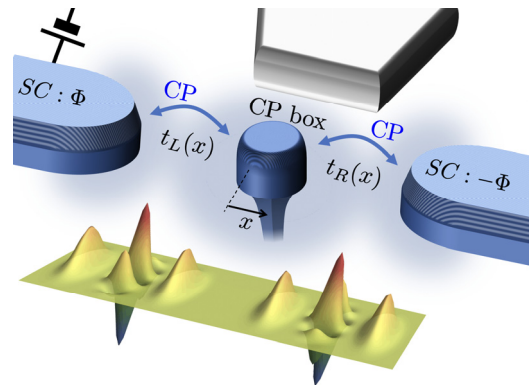
또한, 역학적 공진기는 복잡한 다중 포논 상태(multi-phonon states), 즉 슈뢰딩거의 고양이 상태(Schrödinger cat states) 내에서 양자 정보를 저장할 수 있는 플랫폼을 제공합니다. 이러한 상태는 외부 섭동에 대해 보다 강한 특성을 가집니다. 이는 단일 포논 상태에서는 양자 정보가 손실되면 복구할 수 없는 반면, 다중 포논 상태에서는 역학적 손실에 대한 오류 검출 및 보정이 가능하다는 의미입니다 [23]. 단일 원자와 광자를 이용한 슈뢰딩거의 고양이 상태는 광학 분야에서는 활발히 연구되어 왔습니다 [24].

본 연구에서는 나노역학적 고양이 상태 내에서 큐비트 상태를 인코딩하는 것을 중심으로, 전하 큐비트와 나노역학적 공진기 사이에서 양자 얽힘을 생성할 가능성을 탐색합니다.

2. 관련 연구

최근 나노전자기계 시스템(NEMS)의 발전은 양자역학과 기계적 운동을 결합하는 새로운 가능성을 열었으며, 특히 초전도 하이브리드 시스템에서 주목받고 있습니다. 그중에서도 초전도 큐비트와 나노역학적 공진기를 결합하여 양자 결맞음(coherence)과 얽힘(entanglement)을 양자 정보 처리에 활용하는 연구가 진행되고 있습니

다. 이러한 시스템은 기계적 자유도를 양자 수준에서 정밀하게 제어할 수 있도록 하며, 슈뢰딩거 고양이 상태와 같은 비고전적 상태의 생성을 가능하게 한다. 또한, 초전도 전하 큐비트와 나노기계적 운동 간의 상호작용은 양자 상태 전이, 오류 보정, 양자 결맞음 시간 연장 등의 새로운 메커니즘을 도입할 수 있습니다. 특히, 이 시스템에서 포논(phonon)을 매개로 한 상호작용을 활용하면 기계적 공진기를 양자 메모리 요소로 활용할 수 있으며, 이를 통해 장기간 정보 저장 및 전송이 가능한 확장 가능한 양자 네트워크를 구축할 수 있을 것으로 기대됩니다.



[Fig. 1] **The proposed System:** There are two bulk superconducting contacts with phases Φ and $-\Phi$ biased by voltage V with a superconducting island (Cooper pair box) in between. $t_{L(R)}(x)$ are the tunneling amplitudes for the Cooper pairs between the leads and the CP box, dependent on position x . V_G is the gate voltage. The figure below the system is the result of the Wigner function which shows the quantum entanglement between the nanomechanical states and charge states.

이러한 연구에서 주요 도전 과제는 환경적 노이즈와 역학적 소산(dissipation)으로 인해 양자 상태가 빠르게 결잃음(decoherence)하는 문제를 해결하는 것입니다. 연구자들은 이를 극복하기 위해 기저 상태 냉각(ground-state cooling), 동적 디커플링(dynamical decoupling), 광 또는 마이크로파 공진기를 포함한 하이브리드 아키텍처와 같은 다양한 기법을 연구하고 있습니다. 또한, 이론적 연구에 따르면 초전도 회로를 이용하여 기계적 시스템에서 강한 비선형 상호작용을 조절할 수 있으며, 이를 통해 고도로 얽힌 상태를 생성하고 양자 오류 보정 프로토콜을 구현할 수 있습니다 [25]. 실험 기술이 계속 발전함에 따라, 나노기계적 운동과 초전도 큐

비트의 융합은 양자 트랜스듀서, 센서, 분산형 양자 컴퓨팅 플랫폼과 같은 미래 양자 기술 개발에서 중요한 역할을 할 것으로 기대됩니다.

3. 제안한 모델 시스템

제안된 나노기계적 전하 큐비트 시스템의 개략도는 그림 1에 나타나 있습니다. 이 시스템은 두 개의 벌크 초전도체 사이에 위치한 초전도 섬(superconducting island)으로 구성되며, 역학적 운동이 가능합니다. 예를 들어, 이 섬은 역학적 기둥(pillar) 끝에 부착될 수 있으며, 그 운동은 조화 진동자로 모델링할 수 있습니다.

게이트 전극은 초전도 섬(superconducting island)에 전기 퍼텐셜을 형성합니다. 본 연구에서는 이 섬을 전하 큐비트, 특히 쿠퍼 쌍 상자(Cooper pair box, CPB)로 모델링하며, 기저 상태(basis states)는 전하량에 의해 기술 됩니다. 이 상태는 섬 내에 초과되는 쿠퍼 쌍(Cooper pair)이 존재하는지 여부로 0과 1로 나타낼 수 있으며, 각각 '중성 상태(neutral state)'와 '충전 상태(charged state)'로 부를 수 있습니다.

CPB와 벌크 초전도 전극 사이의 터널 결합(tunnel coupling)은 전하 큐비트 상태 간 전이를 가능하게 합니다. 상태의 전이 진폭(transition amplitude)은 초전도 섬과 전극 사이의 거리와 초전도 위상(superconducting phase)에 의해 영향을 받습니다. 쿠퍼쌍이 전극과 초전도 섬사이를 터널링할 확률은 거리에 대해 지수적으로 줄어들거나 늘어납니다. 거리가 가까워지면 커지고 멀어지면 작아집니다. 또한 벌크 초전도 전극에 인가된 바이어스 전압 V 는 초전도 위상 차이 Φ 에 시간 의존적 변화를 유도하며, 이는 조셉슨 관계식(Josephson relation) $\dot{\Phi}(t)/dt=2eV(t)/\hbar$ 에 의해 기술됩니다. 전하 큐비트와 역학적 기둥이 결합된 동역학을 설명하는 해밀토니안은 $\hat{H} = \hat{H}_0 + \hat{H}_1$ 에 의해 다음과 같은 항으로 표현될 수 있습니다:

$$\hat{H}_0 = E_C \cos(\Phi(t)) \hat{\sigma}_1 + \hbar\omega \left(\frac{\hat{p}^2}{2} + \frac{\hat{x}^2}{2} \right), \quad (1)$$

$$\hat{H}_1 = eE_J \hat{x} \sin(\Phi(t)) \hat{\sigma}_2.$$

해밀토니안 H_0 의 첫 번째 항은 CPB와 벌크 초전도체 사이의 터널 결합을 나타내며 이는 위치에 독립적인 부분을 나타내며, 여기서 E_J 는 조셉슨 에너지(Josephson

energy)로 조셉슨 접합에 초전류(supercurrent)를 만들어 내는 기본적인 원인이 됩니다. 둘 사이의 전류 및 에너지는 양쪽 전극 사이의 위상 차이 $\Phi(t)$ 에 의해 발생합니다. 이때, 전하 큐비트 힐베르트 공간에서의 파울리 행렬(Pauli matrices)이 사용되며, 특히 벡터 (1,0)과 (0,1) 이 각각 충전 상태(charged state)와 중성 상태(neutral state)를 나타내는 기저에서 정의됩니다.

H_0 의 두 번째 항은 역학적 진동자의 운동량 p 및 좌표 x 를 포함한 역학적 물리계인 진동자를 기술합니다. 이는 역학적인 움직임의 양자 상태인 포논의 생성 연산자 a^\dagger 와 소멸 연산자 a 에 의해 포논의 개수 $n = a^\dagger a$ 에 해당하는 개수 상태에 의해 기술이 됩니다. 해밀토니안 H_1 은 나노역학 및 전자의 운동을 기술하는 전기 및 역학적 물리계(nanomechanical and electronic subsystems) 사이의 결합을 설명하며, 이는 터널 결합의 위치 의존적 요소에 의해 유도되는 쌍극자 결합으로 근사됩니다.

4. 결과

린블라드 방정식(Lindblad equation)을 이용하면 고양이 상태(Cat-state)의 동역학적 시간 변화에 대한 결잃음(decoherence)에 대한 연구를 수행할 수 있고, 그 운동방정식은 다음과 같이 기술할 수 있습니다:

$$\frac{d\rho}{dt} = -\frac{i}{\hbar} [H(t), \rho(t)] + \Gamma \left(J\rho(t)J^\dagger - \frac{1}{2} \{J^\dagger J, \rho(t)\} \right), \quad (2)$$

$$H(t) = E_C \cos(\nu t) \hat{\sigma}_1 + \hbar\omega a^\dagger a + \epsilon \frac{E_J}{\sqrt{2\omega}} \sin(\nu t) (a^\dagger + a) \hat{\sigma}_2$$

여기에서 $\rho(t)$ 는 물리적인 상태를 나타내는 밀도 행렬이며, Γ 는 감쇠비율이고, J 는 점프 연산자입니다. 방정식의 오른쪽 첫 번째 항은 앞선 식의 전자계와 역학계의 결합으로 쓰여진 해밀토니안을 양자화하여 역학적인 움직임을 양자화된 단순조화진동자로 기술한 것입니다. a 과 a^\dagger 연산자는 포논을 하나 없애거나 만들어내는 연산자이며 둘의 합은 변위와 같은 연산자입니다. 두 번째 항이 더해지는 것은 이 물리계가 외부 환경과 상호작용을 하여 상태를 유지하지 못하고 결잃음이 발생하는 것을 기술합니다.

고양이 상태(Cat-state)의 동역학적 시간 변화가 큐비

트의 결잃음(decoherence)에 민감하지만, CPB의 역학적 진동은 결잃음에 둔감하다고 가정을 합니다. 여기서 큐비트는 전류를 포함하는 두 가지 상태의 중첩(superposition)으로 간주되며, 이는 σ_1 의 고유 상태(eigenstates)입니다.

또한, 우리는 결잃음의 주요 원인으로 위상 소실(phase dephasing)에 초점을 맞춥니다. 위상 소실은 큐비트가 z-축을 중심으로 임의의 회전을 하도록 하며, 즉 $J = \hat{\sigma}_1$ 입니다. 이에 따라 린드블라드 방정식(Lindblad equation)은 다음과 같이 표현됩니다:

$$\frac{d\rho}{dt} = -\frac{i}{\hbar} [H(t), \rho(t)] + \Gamma\sigma_1\rho(t)\sigma_1 - \Gamma\rho(t). \quad (3)$$

역학계의 양자 상태를 특성화하기 위해, 위그너 함수(Wigner function) $W(x, p, t)$ 를 사용하는 것이 편리합니다. 이는 다음과 같이 정의됩니다:

$$W(x, p, t) = \frac{1}{\pi\hbar} \int \rho(x+y, x-y, t) \exp\left(\frac{i2py}{\hbar}\right) dy, \quad (4)$$

여기서 $\rho(x_1, x_2, t)$ 는 x-표현에서의 밀도 행렬(density matrix)입니다.

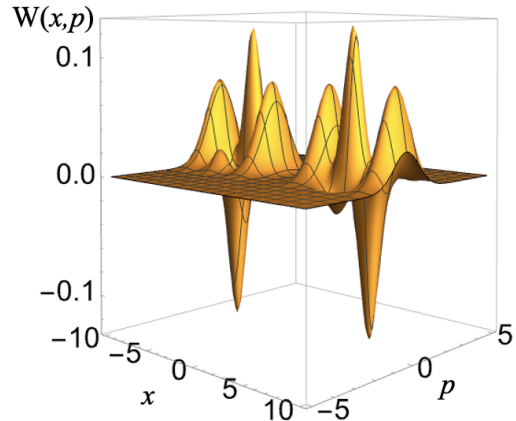
위그너 분포 $W(x, p, t)$ 가 그림2와 같이 고양이 상태(Cat-state)를 직관적으로 시각화해 주는 것을 확인할 수 있습니다. $x = \pm 5$ 주변에 국소화된 정지 상태(immobile state)로 인해, 위그너 분포는 결잃음이 없는 경우에는 나타나지 않는 간섭 무늬(interference fringes)를 형성하며 음의 값을 갖는 것이 특징입니다.

그림 2에는 특정 시점에서의 위그너 함수가 제시되어 있습니다. 초기에 두 개의 결맞음 상태는 바이어스 전압을 차단한 후 다시 인가하면 위그너 함수는 양의 값과 음의 값을 모두 가지게 되며, 이는 두 큐비트 상태와 역학적 물리계의 두 고양이 상태(cat states) 간의 얽힘을 나타냅니다.

우리는 역학적 진동과 전하 큐비트 사이의 얽힌 고양이 상태(entangled cat state) 생성에 대한 결잃음(decoherence)의 영향을 연구했습니다. 주요 결잃음 원인으로 (i) 역학적 진동자의 포논(phonon) 손실과 (ii) 쿠퍼 쌍 상자(Cooper pair box, CPB) 내 전하 상태 간 플립(flip)을 고려했습니다.

결잃음이 고양이 상태의 생성을 완전히 방해하여 고양이 상태가 전혀 나타나지 않게 하는 것이 아니라, 오히려 결잃음의 영향으로 인해 얽힌 고양이 상태와 기타 상태들이 혼합된 앙상블(mixed ensemble) 형태로 나타남을

발견하였습니다. 마지막으로, 얽힌 고양이 상태는 결잃음 시간 스케일(decoherence time scale) 내에서 상당한 비중을 유지하며 생존함을 확인하였습니다.



[Fig. 2] **Wigner distributions:** The Wigner function $W(x, p)$ for $E_J/\hbar\omega = 1.4$ is plotted at special time. Two entangled states of qubit and nanomechanical oscillator develop after applying the protocol with bias voltage, two cat states emerge.

5. 논의 및 결론

우리는 조화 진동을 수행하는 이동 가능한 쿠퍼 쌍 상자(Cooper pair box, CPB) 큐비트로 구성된 나노전자 역학 시스템의 양자 동역학을 연구하였습니다. 이 시스템에서 벌크 초전도체 두 개가 CPB와 쿠퍼 쌍 터널링(Cooper pair tunneling)을 통해 결합되어 있으며, 이 결합은 인가된 바이어스 전압에 의해 제어됩니다.

분석적 및 수치적 방법을 활용하여, 초전도체의 교류 조셉슨(AC Josephson) 주파수가 CPB의 기계적 진동 주파수와 공명할 때, CPB의 기저 상태와 진동자의 0-포논 상태로 구성된 초기 순수 상태가 시간에 따라 큐비트 상태와 얽힌 코히런트 기계적 상태로 진화함을 확인하였습니다. 앞선 논문에서 바이어스 전압을 조절하는 프로토콜을 제안하여, 나노역학적 코히런트 상태의 양자 중첩으로 구성된 이른바 고양이 상태(cat states)를 포함하는 얽힘 상태의 형성을 유도할 수 있음을 보였습니다 [26]. 이러한 상태의 형성은 위그너 함수(Wigner function) 분석을 통해 확인되었으며, 이는 음의 값을 나타내어 비고전적 상태를 의미합니다.

이 연구 결과는 전하 큐비트에 역학적 결맞음 상태의 중첩으로 양자 정보를 인코딩할 수 있는 이론적 틀을 제공합니다. 특히, 다중 포논(multi-phonon) 상태는 단일 포논 폭(Fock) 상태보다 외부 섭동에 대한 강인성이 높아 양자 통신(quantum communication)에서 유망한 접근 방식으로 평가됩니다. 이를 이용하여 양자 얽힘 네트워크를 실현할 수 있는 이론적인 기틀이 마련 될 것을 기대할 수 있으며, 양자 보안으로 향상된 사물인터넷의 발전에 큰 기여를 할 수 있는 기초연구가 될 것이라고 판단됩니다. 이를 기반으로 양자 얽힘 네트워크(QEN)에 대한 연구가 활발히 이루어질 것을 기대합니다 [27-29]. 이로써 양자 얽힘 사물인터넷(Quantum Entangled Internet of Things: QuEIoT)을 통해 강화된 보안 사물인터넷의 시대를 열 시금석이 되기를 기대해 봅니다.

REFERENCES

- [1] R.C.Jaklevic, and J.Lambe, "Molecular Vibration Spectra by Electron Tunneling", *Phys. Rev. Lett.* Vol.17, pp.1139, 1966.
- [2] L.I.Glazman, R.I.Shekhter, "Inelastic resonant tunneling of electrons through a potential barrier", *Zh. Eksp. Teor. Fiz.* Vol.94, pp.292-306, 1988; *Sov. Phys. JETP* Vol.67, pp.163, 1988.
- [3] B.C.Stipe, M.A.Rezaei, and W.Ho, "Single-Molecule Vibrational Spectroscopy and Microscopy", *Science* Vol.280, pp.1732-1735, 1998.
- [4] H.Park, J.Park, A.K.L.Lim, E.H.Anderson, A.P.Alivisatos, and P. L. McEuen, "Nanomechanical oscillations in a single-C60 transistor", *Nature* Vol.407, pp.57-60 (2000).
- [5] J.Park, A.N.Pasupathy, J.I.Goldsmith, C.Chang, Y.Yaish, J.R.Petta, M.Rinkoski, J.P.Sethna, H.D.Abruna, P.L.McEuen, and D.C.Ralph, "Coulomb blockade and the Kondo effect in single-atom transistors", *Nature* Vol.417, pp.722-725, (2002).
- [6] R.H.M.Smit, Y.Noat, C.Untiedt, N.D.Lang, M.C.van Hemert, and J.M.van Ruitenbeek, "Measurement of the conductance of a hydrogen molecule", *Nature* Vol.419, pp.906-909, 2002.
- [7] K.-H.Ahn, H.C.Park, J.Wiersig, and J.Hong, "Current Rectification by Spontaneous Symmetry Breaking in Coupled Nanomechanical Shuttles", *Phys. Rev. Lett.* Vol.97, pp.216804, 2006.
- [8] C.Kim, J.Park, and R.H.Blick, "Spontaneous Symmetry Breaking in Two Coupled Nanomechanical Electron Shuttles", *Phys. Rev. Lett.* Vol.105, pp.067204 2010.
- [9] F.S.Bergeret, P.Virtanen, T.T.Heikkila, J.C.Cuevas, "Theory of Microwave-Assisted Supercurrent in Quantum Point Contacts", *Phys. Rev. Lett.* Vol.105, pp.117001, 2010.
- [10] V.I.Talyanskii, J.M.Shilton, M.Pepper, C.G.Smith, C.J.B.Ford, E.H.Linfield, D.A.Ritchie, and G.A.C.Jones, "Single-electron transport in a one-dimensional channel by high-frequency surface acoustic waves", *Phys. Rev. B* Vol.56, pp.15180, 1997.
- [11] P.Stadler, W.Belzig, and G.Rastelli, "Ground-State Cooling of a Carbon Nanomechanical Resonator by Spin-Polarized Current", *Phys Rev Lett.* Vol.113, pp.047201, 2014.
- [12] C.Urgell, W.Yang, S.L.De Bonis, C.Samanta, M.J.Esplandiu, Q.Dong, Y.Jin, and A.Bachtold, "Cooling and self-oscillation in a nanotube electromechanical resonator", *Nat. Phys.*, Vol.16, pp.32-37 2020.
- [13] L.Y.Gorelik, A.Isacsson, M.V.Voinova, B.Kasemo, R.I.Shekhter, and M.Jonson, "Shuttle Mechanism for Charge Transfer in Coulomb Blockade Nanostructures", *Phys. Rev. Lett.* Vol.80, pp.4526, 1998.
- [14] L.Y.Gorelik, A.Isacsson, Y.M.Galperin, R.I.Shekhter, and M.Jonson, "Coherent transfer of Cooper pairs by a movable grain", *Nature* Vol.411, pp.454-457, 2001.
- [15] A.Isacsson, L.Y.Gorelik, R.I.Shekhter, Y.M.Galperin, and M.Jonson, "Mechanical Cooper Pair Transportation as a Source of Long-Distance Superconducting Phase Coherence", *Phys. Rev. Lett.* Vol.89, pp.277002, 2002.
- [16] C.Padurariu, C.J.H.Keijzers, and Yu.V.Nazarov, "Effect of mechanical resonance on Josephson dynamics", *Phys. Rev. B* Vol.86, pp.155448, 2012.
- [17] B.H.Schneider, S.Etaki, H.S.J.van der Zant, G.A.Steele, "Coupling carbon nanotube mechanics to a superconducting circuit", *Scientific Reports* Vol.2, pp.599, 2012.
- [18] C.T.Hann, C.-L.Zou, Y.Zhang, Y.Chu, R.J.Schoelkopf, S.M.Girvin, and L.Jiang, "Hardware-Efficient Quantum Random Access Memory with Hybrid Quantum Acoustic Systems", *Phys. Rev. Lett.* Vol.123, pp.250501, 2019.
- [19] Y.Chu, P.Kharel, T.Yoon, L.Frunzio, P.T.Rakich, and R.J.Schoelkopf, "Creation and control of multi-phonon Fock states in a bulk acoustic-wave resonator", *Nature* Vol.563, pp.666-670, 2018.
- [20] P.Arrangoiz-Arriola, E.A.Wollack, Z.Wang, M.Pechal, W.Jiang, T.P.McKenna, J.D.Witmer, R.Van Laer, and A.H.Safavi-Naeini, "Resolving the energy levels of a nanomechanical oscillator", *Nature* Vol.571, pp.537-540, 2019.
- [21] A.Bienfait, K.J.Satzinger, Y.P.Zhong, H.-S.Chang, M.-H.Chou, C.R.Conner, E.Dumur, J.Grebel, G.A.Pearis, R.G.Povey, and A.N.Cleland, "Phonon-mediated quantum state transfer and remote qubit entanglement", *Science* Vol.364, pp.368-371, 2019.
- [22] K.J.Satzinger, Y.P.Zhong, H.-S.Chang, G.A.Pearis, A.Bienfait, M.-H.Chou, A.Y.Cleland, C.R.Conner,

- E.Dumur, J.Grebel, I.Gutierrez, B.H.November, R.G.Povey, S.J.Whiteley, D.D.Awschalom, D.I.Schuster, and A.N.Cleland, "Quantum control of surface acoustic-wave phonons", Nature Vol.563, pp.661-665, 2018.
- [23] S.M.Girvin, "Schrodinger Cat States in Circuit QED", arXiv:1710.03179v1 [quant-ph], 2017.
- [24] B.Hacker, S.Welte, S.Daiss, A.Shaukat, S.Ritter, L.Li, and G.Rempe, "Deterministic creation of entangled atom-light Schrödinger-cat states", Nature Photon Vol.13, pp.110-115, 2019.
- [25] F.Pistoiesi, "The journey to a mechanical qubit", Science Vol.386, pp.728-729, 2024.
- [26] D.Radic, S.-J.Choi, H.C.Park, J.Suh, R.I.Shekhter, L.Y.Gorelik, "Nanomechanical cat states generated by a dc voltage-driven Cooper pair box qubit", npj Quantum Information, Vol.8, pp.74, 2022.
- [27] Y.Kyung, T.Kim, Y.Kim, "Retained Message Delivery Scheme utilizing Reinforcement Learning in MQTT-based IoT Networks", JKIoT Vol.10, No.2, pp.131-135, 2024.
- [28] M.Lee, "Smoothing Algorithm Considering Server Bandwidth and Network Traffic in IoT Environments", JKIoT Vol.8, No.1, pp.53-58, 2022.
- [29] J.Lee, "Analysis of the Hardware Structures of the IoT Device Platforms for the Minimal Power Consumption", JKIoT Vol.6, No.2, pp.11-18, 2020.

박 희 철(Hee Chul Park)

[정회원]



- 2004년 8월 : 충남대학교 물리학과 (이학사)
- 2007년 2월 : 충남대학교 물리학과 (이학석사)
- 2010년 2월 : 충남대학교 물리학과 (이학박사)
- 2010년 3월 ~ 2011년 8월 : 예테보리대학교 물리학과 박사후연구원
- 2011년 10월 ~ 2015년 5월 : 고등과학연구원 계산물리학부 연구위원
- 2015년 5월 ~ 2023년 2월 : 기초과학연구원 복잡계이론 물리센터 연구위원
- 2023년 3월 ~ 현재 : 국립부경대학교 물리학과 교수

〈관심분야〉

양자 나노 소자, 양자 계산, 위상물리, 저차원물질, 복잡계 네트워크, 사물인터넷(IoT)