

불확정성의 원리와 큐비트, 그리고 양자컴퓨터

전기, 정보 공학부 허재성

‘작은 세계’에 대한 관심이 날로 높아지고 있다. 마이크로, 나노라는 단어가 과학 관련뉴스를 통해 우리 귀에 익숙해진지도 오래다. 화학·생물공학, 재료공학, 기계공학 등 다양한 분야에서 나노 수준, 더 나아가 원자 수준의 세계를 탐구하고 있다. 전기공학도 예외는 아니다. 분야의 특성상 음전하를 띠는 전자, 그리고 빛의 입자인 광자에 주로 관심을 가진다. 이와 같은 작은 양자(量子)를 입자와 파동 모두로 계산하고 그 결과를 확률로 해석하는 학문을 양자역학이라고 한다. 1927년 독일의 물리학자 베르너 하이젠베르크가 제안한 불확정성의 원리는 양자역학의 핵심 원리다.

불확정성의 원리는 ‘위치의 불확정성과 운동량의 불확정성의 곱은 항상 어떤 상수보다 크다.’는 내용을 기본으로 한다. 어떤 정밀한 장치로 측정한다고 하더라도 위치의 부정확도와 운동량의 부정확도의 곱은 언제나 h' 보다 크고, 결코 이보다 작을 수는 없다. 위치의 부정확도를 Δx , 질량과 속도의 곱인 운동량의 부정확도를 Δp 라 할 때, 아래의 수식이 성립한다.

$$\Delta x \times \Delta p \geq h' \quad (h' = 1.055 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s})$$

수식 1 불확정성의 원리

이해를 돕기 위해 다음과 같은 예를 살펴보자. 전자를 관찰할 수 있는 현미경이 있다고 가정해보자. 우리가 전자를 보기 위해서는 빛이 전자에 충돌하여 우리 눈으로 들어와야 한다. 빛의 위치를 정확하게 측정하려면 파장이 짧은 빛을 사용해야 되는 데, 파장이 짧으면 에너지가 크기 때문에 빛이 전자를 때렸을 때 운동량의 오차가 커진다. 반대로 빛의 운동량을 정확히 측정하려면 에너지가 작은 빛을 사용해야 되지만, 에너지가 작으면 파장이 길어 위치의 오차가 커진다. 두 물리량 모두를 정확히 측정하는 것은 불가능하다. ‘하이젠베르크 현미경’이라고도 불리는 이 가상의 측정장치는 보어도 불확정성 원리를 설명하기 위해 자주 인용하곤 했다.

불확정성의 원리는 실생활에서는 관찰되지 않는다. 수식 1에서 볼 수 있듯이 두 부정확도의 곱의 오차가 10^{-34} J·s로 매우 작기 때문이다. 달리는 자동차나 투수가 던진 공과 같이 일상에서 흔히 보이는 물체들은 위치와 운동량이 크기 때문에 위치나 속도가 조금 변한다고 해서 그것이 육안으로는 관찰되지 않는다.

하지만 반도체공정과 같은 미시세계를 다루는 곳에서 불확정성의 원리는 중요한 고려대상이다. ‘제한된 공간 안에 얼마나 많은 정보를 담을 수 있느냐.’는 반도체 분야에서 항상 중요한 화두였다. 몇 제곱센티미터의 너비 속에 테라바이트(TB) 단위의 정보를 넣으려다 보니 마이크로나 나노를 넘어 그보다 더 작은 세계에 관심을 갖게 되었다. 여기서는 불확정성의 원리에 의한 효과를 무시할 수가 없었다. 나노미터 이하의 세계에 들어서면 0과 1이라는 비트(bit)정보를 처리하는 트랜지스터도 그만큼 작아져야하고, 이 작은 세계에서는 입자의 불확정성 때문에 0과 1이 분명하게 구분이 안 된다. 이는 정보의 불분명으로 이어진다. 반도체공학자들은 이런 소자의 집적화에 한계에 부딪혀 아직도 골머리를 앓고 있다.

최근에는 다른 공학자들이 큐비트(Qubit)라는 개념을 도입해 많은 정보를 더 빠르게 전달하는 방법을 연구하고 있다. 기존의 컴퓨터에서 사용되는 비트는 전류가 흐르느냐 안 흐르느냐의

차이기 때문에 0과 1 두 가지 종류의 상태만 갖는다. 하지만 큐비트는 위치의 불확정성 때문에 양자가 0과 1의 상태를 동시에 가질 수 있음을 이용한다. 이를 양자가 ‘중첩’된 상태에 있다고 표현한다. 양자의 중첩을 이용하면 0과 1만으로 정보를 처리하던 기존의 컴퓨터와는 달리 더 크고 빠른 계산을 할 수 있다. 비트는 원자 크기에 가까워지면서 0과 1이 불분명해져 한계에 도달하지만 큐비트는 반대인 것이다.

양자컴퓨터는 이 큐비트를 정보의 기본 단위로 쓰는 새로운 종류의 컴퓨터이다. 계산능력은 엄청나다. 만약 32큐비트의 연산능력을 가진 양자컴퓨터가 존재한다면 약 40억 개의 서로 다른 연산을 동시에 할 수가 있다고 한다. 하나의 연산에 1초가 걸린다고 가정했을 때, 기존의 컴퓨터가 40억 개의 연산을 하는 데 필요한 시간은 40억 초, 약 100년이다. 그러나 32큐비트의 양자컴퓨터는 같은 연산을 1초에 할 수 있다.

하지만 현실 세계에서 사용되기엔 넘어야 할 산이 많다. 가장 큰 문제는 ‘양자결맞음’이다. 불확정성의 원리와 같은 양자의 성질이 잘 나타나려면 양자가 ‘순수한 상태’에 있어야 하는데 이 상태를 양자결맞음이라고 한다. 결맞음이 잘 일어날수록 방해가 적어 더 정확한 연산이 가능해지는 데 이게 쉽지가 않다. 현재 많은 공학자들이 결맞음을 만들고 유지하는 방법을 연구하고 있다. 이외의 몇 가지 문제들을 더 해결한다면 머지않아 양자컴퓨터를 사용하게 될 날이 올 것이다.