

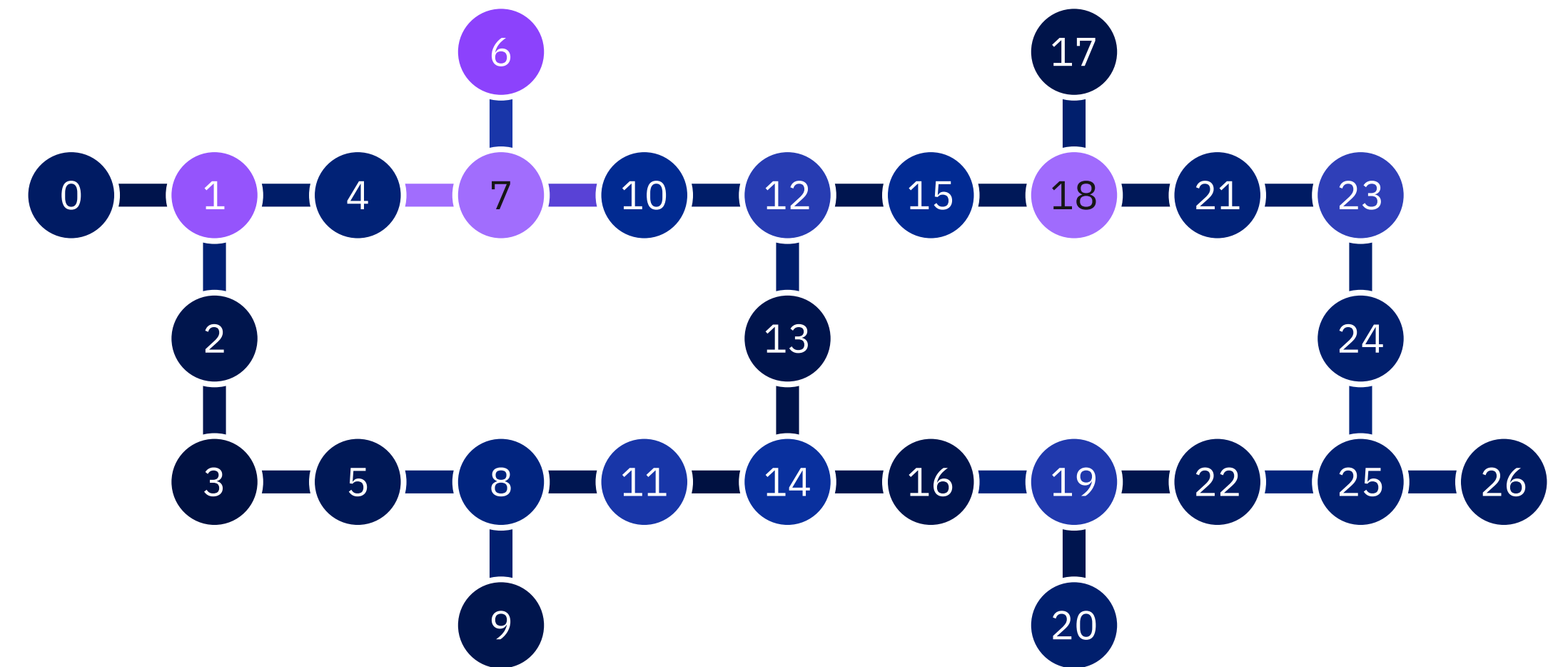
# 잡음이 적은 양자 회로를 위한 자동 최적화

이중훈, 강찬구, 오학주  
고려대학교 소프트웨어분석연구실

# 잡음이 너무 심한 양자 컴퓨터 하드웨어

## 이론적 배경

- 큐비트마다 잡음이 **균등하지 않음**
  - 보라색에 가까울 수록 잡음 심함
  - 주변 환경 요소에 아주 예민하게 반응
- 큐비트(노드) 에러율 최대 **3%**
- 양자 게이트(엣지) 에러율 최대 **2%**
- 잡음을 없애는 것은 현실적으로 아주 어려운 상황

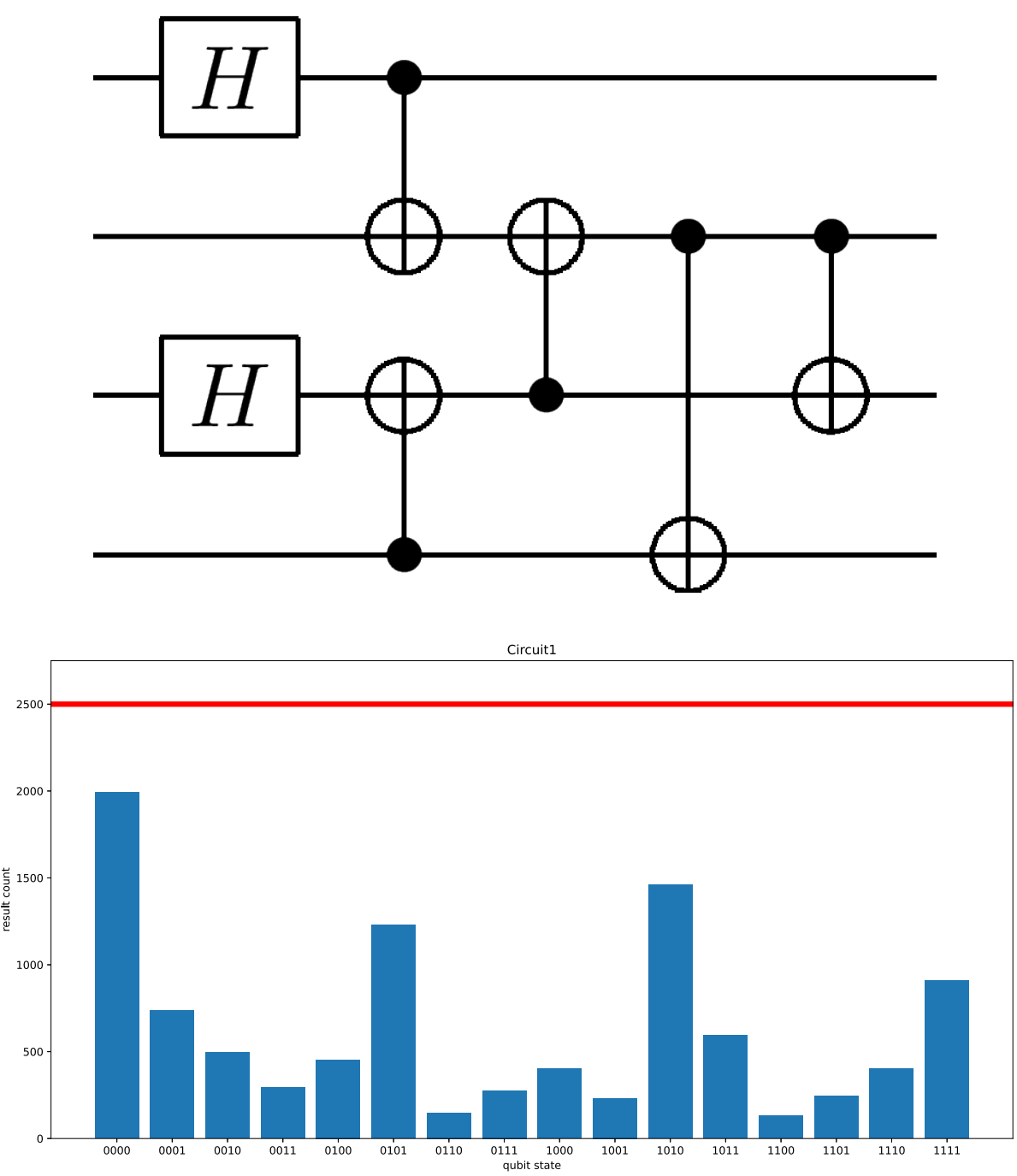


IBM 양자컴퓨터 큐비트 배치 그래프  
노드: 큐비트 / 엣지: 큐비트간 연결 게이트

# 양자 회로 자동 최적화를 통한 잡음 감소

연구 동기

$$|0\rangle \mapsto \frac{1}{2}(|0\rangle + |5\rangle + |10\rangle + |15\rangle)$$

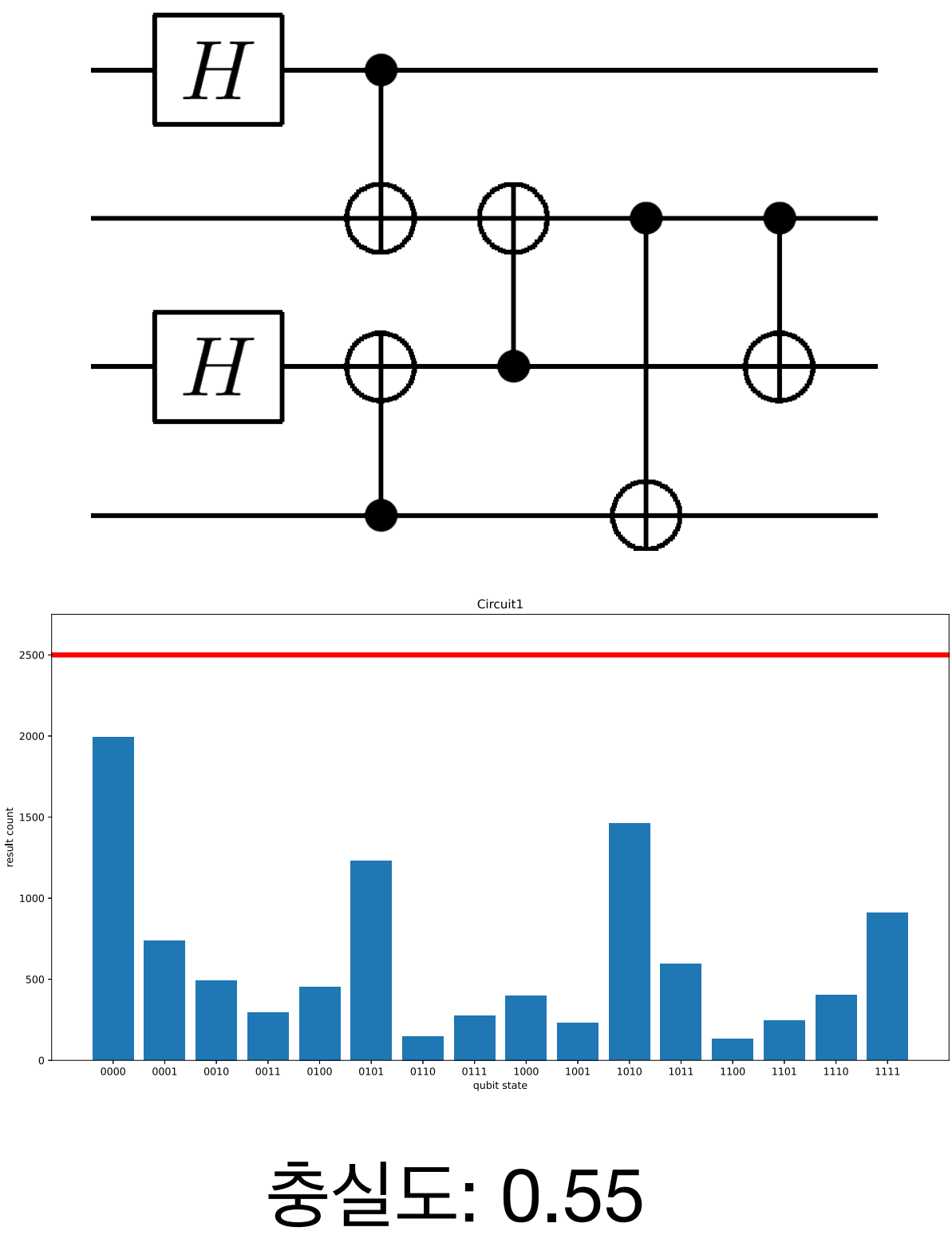


총실도: 0.55

더 좋은 회로는 없는가?

# 양자 회로 자동 최적화를 통한 잡음 감소

## 연구 목표

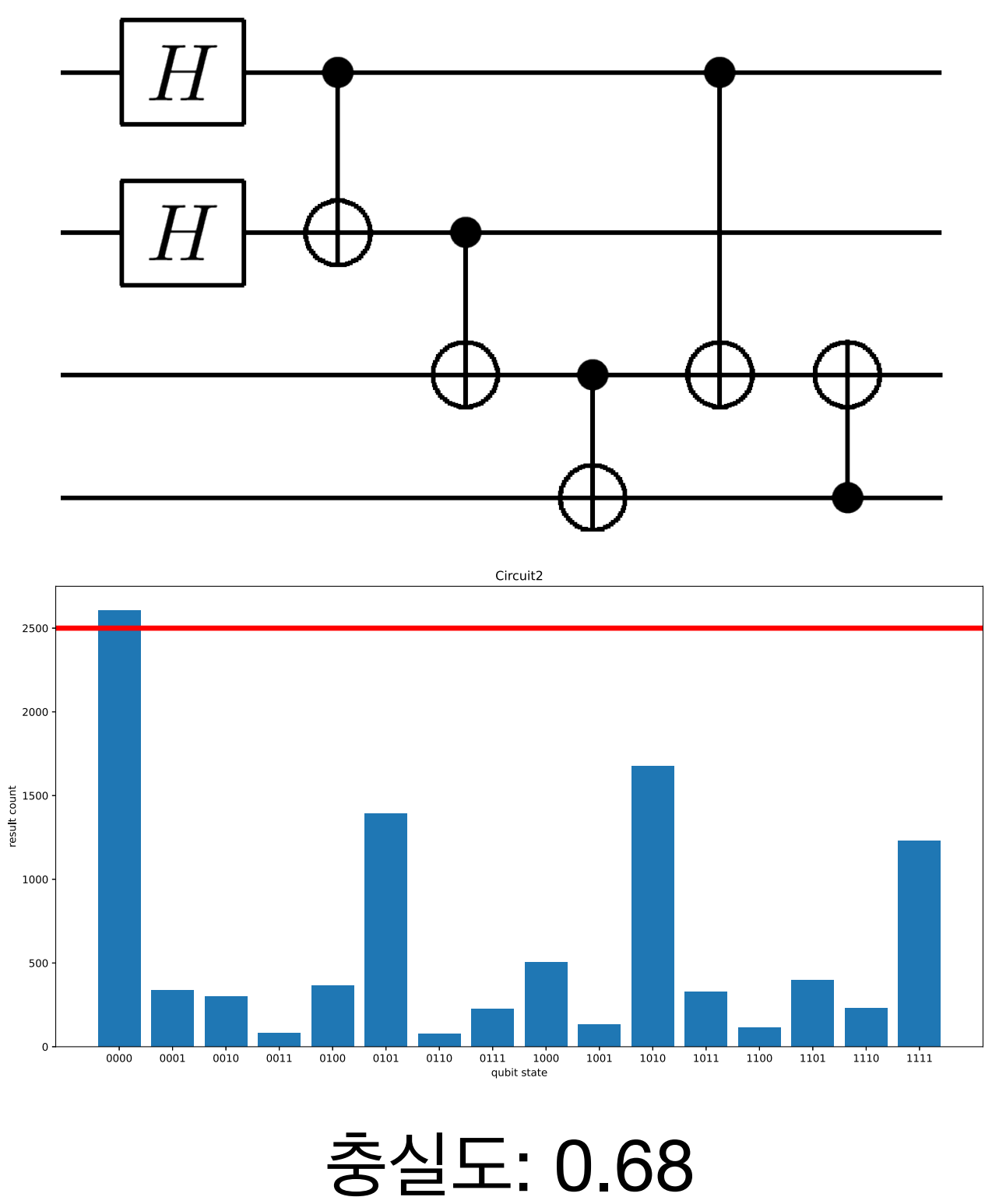


양자 회로 자동 최적화



동일 계산 수행하는  
다른 회로로 변환

$$|0\rangle \mapsto \frac{1}{2}(|0\rangle + |5\rangle + |10\rangle + |15\rangle)$$



- 총실도 : 잡음 없는 이상적 상태와 실제 잡음 상태 간의 거리  $F(X, Y) = \left( \sum_i \sqrt{p_i q_i} \right)^2$

# 회로 변환 전략

## 접근 방법

1. 들뜬 상태 유지가 어려움

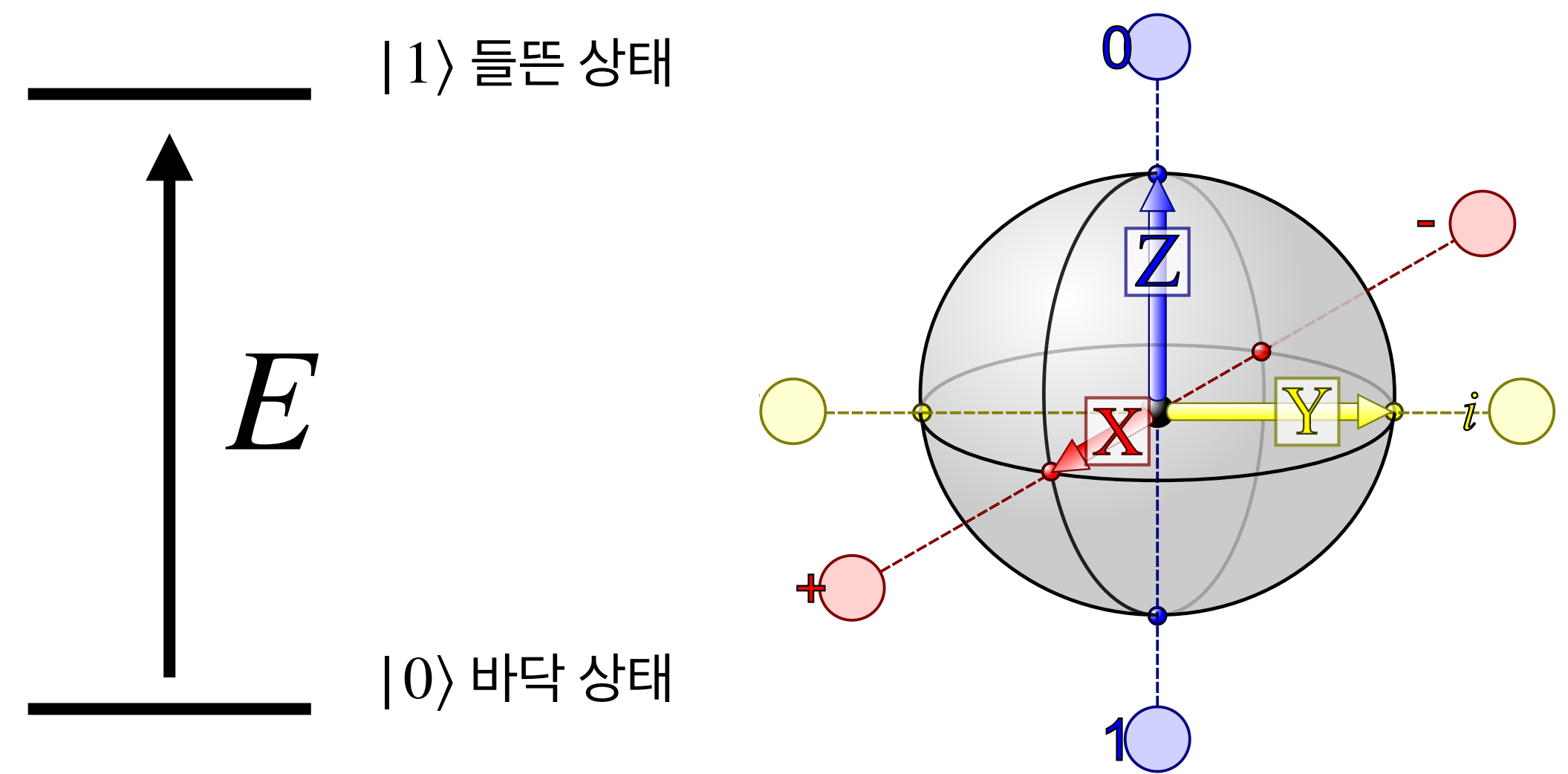
➡ 바닥 상태 유지 시간 최대화

2. 위상 유지가 어려움

➡ 위상 없는 상태 유지 최대화

3. 얽힘 상태 유지가 어려움

➡ 회로 내 연속 얽힘 최소화



유지하기 어려운 상태에 존재하는 시간 최소화

# 요약 및 향후 계획

## • 연구 목표

- 양자 회로의 잡음 감소, 실행 결과 충실도 증가

## • 핵심 방법

- 양자 상태의 특징 활용

- 유지 어려운 상태에 존재하는 시간 최소화

## • 향후 과제

- 각 특징별 영향력 비교 및 최적화 우선순위 설정

- 최적화 과정에 사용하는 측정 지표 및 목적 함수의 구체화




## 잡음이 적은 양자 회로를 위한 자동 최적화

이중훈 강찬구 오학주  
소프트웨어분석연구실

### 1. 양자컴퓨터란?

#### 양자 컴퓨터의 현황

- 이미 현실화 된 양자 컴퓨터 과학 기술
 

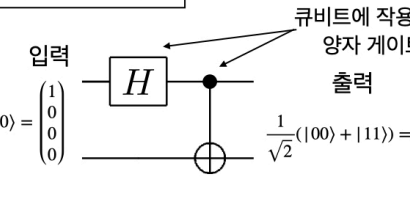


Google wants to build a useful quantum computer by 2029
- 구글 “2029년까지 ‘실용적’ 양자컴퓨터 제작”
- 근미래의 양자 컴퓨터는 ‘잡음’ 시대  
잡음이 없는 완벽한 양자 하드웨어는 극단적으로 어려운 기술 대신, 잡음 있는 양자 상태를 받아들이는 방향으로 양자 컴퓨터의 시장 형성  
➔ Noisy Intermediate-Scale Quantum 시대

#### 양자 계산의 개념

- 양자 프로그램의 기반은 양자 회로
- 계산 모델은 선형대수로 표현
 

$$|00\rangle = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$
- 데이터 상태 값 : 벡터  $\in \mathbb{C}^n$
- 상태 간 변환 : 행렬
- 상태 벡터에 대한 측정 값은 확률적으로 산출



입력:  $\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$   
출력:  $\frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle + |11\rangle) = \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 0 \\ 0 \\ \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix}$

예)  $\frac{1}{2}|0\rangle + \sqrt{\frac{3}{4}}|1\rangle \left\{ \begin{array}{l} \left(\frac{1}{2}\right)^2 = \frac{1}{4} \text{ 확률로 } |0\rangle \text{ 측정} \\ \left(\sqrt{\frac{3}{4}}\right)^2 = \frac{3}{4} \text{ 확률로 } |1\rangle \text{ 측정} \end{array} \right.$

최종 상태를 반복 측정하여 상태 값 분포 계속

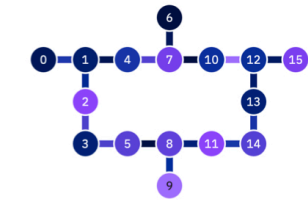
### 2. 연구 동기 : 잡음이 너무 심한 양자 컴퓨터 하드웨어

#### 장시간 양자 상태 유지가 어려움

- 양자 상태를 장시간 유지하는 것은 극단적으로 어려운 기술
- 양자적 입자는 외부 환경에 예민
- 예) IBM의 양자 컴퓨터
  - $|1\rangle$  상태가 완전히 붕괴되기까지의 시간: 102  $\mu s$
  - $|0\rangle + e^{i\theta}|1\rangle$  상태의 위상 정보( $\theta$ )를 잃기까지의 시간: 106  $\mu s$
- 최대한 짧은 시간 안에 양자 계산이 완료되어야 함

#### 불안정한 품질의 큐비트와 양자 게이트

- 큐비트마다 잡음이 **균등하지 않음**
  - 보라색에 가까울 수록 **잡음 심함**
  - 주변 환경 요소에 아주 예민하게 반응
- 큐비트(노드) 에러율 최대 **3%**
- 양자 게이트(엣지) 에러율 최대 **2%**

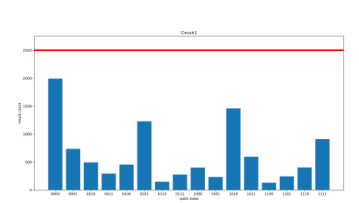


IBM 양자컴퓨터 큐비트 배치 그래프  
노드: 큐비트 / 엣지: 큐비트간 연결 게이트

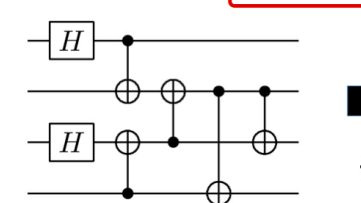
➡ 하드웨어의 물리적 한계에 맞추어 최대한 잡음 적은 회로 확보가 중요

### 3. 목표 : 잡음이 없는 양자 회로를 위한 자동 최적화

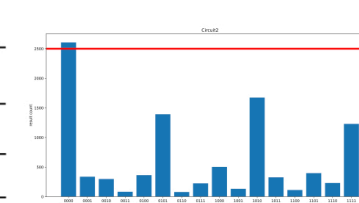
#### 양자 회로 자동 최적화



총실도: 0.55



동일 계산 수행하는 다른 회로로 변환



총실도: 0.68

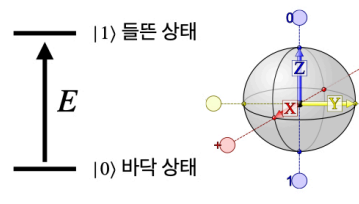
$|0\rangle \mapsto \frac{1}{2}(|0\rangle + |5\rangle + |10\rangle + |15\rangle)$

• 총실도 : 잡음 없는 이상적 상태와 실제 잡음 상태 간의 거리  $F(X, Y) = \left( \sum_i \sqrt{p_i q_i} \right)^2$

### 4. 접근 : 양자 상태의 특징 활용하기

#### 유지가 어려운 양자 상태에 존재하는 시간 최소화

- 들뜬 상태 유지가 어려움  
➔ 바닥 상태 유지 시간 최대화
- 위상 유지가 어려움  
➔ 위상 없는 상태 유지 최대화
- 얽힘 상태 유지가 어려움  
➔ 회로 내 연속 얽힘 최소화



$|1\rangle$  들뜬 상태  
 $|0\rangle$  바닥 상태

### 5. 요약 및 향후 계획

#### 핵심 방법

- 양자 상태의 특징 활용, 유지 어려운 상태에 존재하는 시간 최소화

#### 향후 과제

- 각 특징별 영향력 비교 및 최적화 우선순위 설정
- 최적화 과정에 사용하는 측정 지표 및 목적 함수의 구체화

#### 예상 결과

- 양자 회로의 잡음 감소, 실행 결과 충실도 증가