

# Quantum Speedup on S-DES Known Plaintext Attack

과목 75 최종보고서

2017320009 이상현

2017320023 조민규

June 16, 2020

## 1 서론

한 학기동안, Simplified DES에 대한 Known Plaintext Attack을 Quantum computer (simulator)을 사용하여 공격하는 방법에 관하여 연구하였다. 이를 위해 Microsoft Q#을 사용하여 Quantum S-DES Oracle을 만들어 이에 Grover's Algorithm을 적용시켰다.

## 2 연구 내용

Simplified DES는 Symmetric-key cryptosystem으로, DES와 유사한 구조로 되어 있지만, key size가 10bit, block size가 8 bit으로 줄어들고, 라운드 수 역시 2라운드로 줄어든 간략화된 구조로 되어 있다.

S-DES의 경우 일반 컴퓨터를 사용해서도 공격을 하는 데에 오랜 시간이 걸리지 않는다. 하지만 S-DES는 그 전신인 DES와 유사한 구조로 되어 있고, classic logic gate(And, Or, Not, Xor 등)를 사용하기에 타 Symmetric-key cryptosystem에 이 방법을 적용시켜 활용할 수 있을 것으로 예상된다.

타 cryptosystem을 사용하지 않고 S-DES을 선택한 이유는 비교적 작은 크기라는 점이 가장 크게 작용했다. 현재 상용화되어 있는 Quantum computer의 경우 사용 가능한 Qubit의 수가 굉장히 적고, 일반 컴퓨터에서 활용할 수 있는 Quantum simulator의 경우에는 Qubit의 수가 하나 증가할때마다 실행 시간이 두 배로 증가하여, 어느 쪽을 사용하든 상관없이 Qubit의 수가 적어야 실행이 가능하다는 문제점이 있다. 그렇기 때문에 DES, AES 등 Large-scale cryptosystem이 아닌 Small-scale인 S-DES를 선택하였다.

### 2.1 개별 연구 내용

#### 2.1.1 조민규

Quantum S-DES Oracle에 대한 Theoretical Circuit Diagram을 만들었고, 이에 대한 Q# implementation이 끝난 후 해당 circuit<sup>1</sup>에 대한 Gate analysis를 진행했다.

#### 2.1.2 이상현

Quantum S-DES Oracle과 그를 사용하여 key를 찾는 Grover's Algorithm을 Microsoft Q#을 사용하여 구현했다.

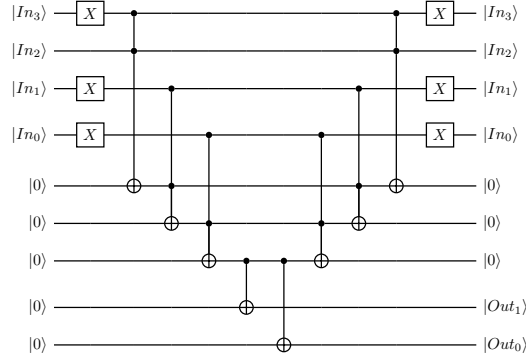
---

<sup>1</sup>Theoretical Circuit에서 Q#에서 제공하는 feature으로 인해 몇몇 Gate가 삭제되거나 변형되었다.

### 3 연구 결과

S-DES의 구조는 대부분이 permutation(또는 compression)이기 때문에 큰 문제가 되지 않는다. 하지만 Expansion과 S-Box의 두 부분에서는 문제가 될 수 있다. Expansion의 경우에는 CNOT gate를 사용하여 정보를 복사한다면 비교적 쉽게 해결할 수 있겠지만, S-Box의 경우에는 Lookup table으로 구성되어 있어 이에 대한 해결방안이 필요하다.

그러기 위해 생각한 방안이 다음과 같은 회로를 사용한 Brute-forcing method이다:



이 회로의 경우 S-Box 1에서 input으로 4(0010)가 들어왔을 때 output으로 3(11)이 나간다는 것을 표현하고 있다. 각 16개의 possibility에 대해 위와 같은 회로를 구성할 수 있고, 이를 연결하여 S-Box를 구현할 수 있다.

다른 방법으로 Quine-McCluskey Algorithm을 통해 S-Box를 minimize 하여 And/Or/Not gate를 활용하는 방안을 생각할 수 있다. 하지만 이 경우 And/Or circuit은 모두 CCNOT gate를 활용해야 하고, 이를 활용하기 위해서는 Ancilla qubit, 즉 추가 Qubit이 필요하여 시공간적인 부담이 커지게 된다.

이를 보완하기 위해 Quine-McCluskey Algorithm으로 minimize된 S-Box를 위의 Brute-forcing method와 비슷한 회로를 사용해 구현하는 Hybrid 방법을 생각해보았지만, 이를 직접 구현하지는 않았다. S-DES의 경우 Static S-Box를 사용하지만 Dynamic S-Box를 사용하는 Cryptosystem의 경우 Quine-McCluskey를 사용하는 것이 오히려 Time loss일 가능성이 생기기 때문이다.

게이트 분석의 경우 실제 Quantum computer에서 Qubit 수의 제한이 없어진다면 가장 중요하게 사용될 Complexity의 Measure이기 때문에 그 개수를 각 게이트의 종류별로 세었다. Brute-force에서는 oracle call 1회당 40회의 CNOT gate, 188회의 Pauli-X gate, 66회의 CCNOT(Toffoli) gate를 사용하고, Hybrid에서는 40회의 CNOT gate, 172회의 Pauli-X gate, 26회의 CCNOT gate를 사용한다. Quine-McCluskey만을 사용하는 경우 Hybrid와 동일하거나 그보다 조금 많은 수준에서 그칠 것이나, Qubit 수에 제한이 있는 현재로서는 사용할 수 없는 방법이기 때문에 계산하지 않았다.

### 4 향후 연구 계획

해당 implementation에 대해서 가장 문제가 되었던 부분은 임의의 Plaintext  $P$ , Ciphertext  $C$ 쌍에 대해  $\{K|C = SDES(P, K)\}$ 의 크기, 즉 Key count가 다르다는 것에 있었다. Grover's Algorithm은 총 가능한 경우의 수에 대해 실제 존재하는 해의 개수의 비율에 따라 Iteration 수를 다르게 해야하는데, 이 수가 균일하지 않다는 것은 Key count를 미리 알아야만 이 Attack을 수행할 수 있다는 것을 의미한다.

2학기에는 해당 문제를 Address하는 것을 목표로 할 예정이다. 보다 정확하게는, Quantum oracle이 주어졌을 때, 실제 존재하는 해의 개수를 알지 못하고도 Grover's Algorithm의 Iteration을 최적화하는 방법에 대해 연구를 진행할 계획이다.