PQC TLS+ PQC 인증서 실습 (NIST PQC)

https://youtu.be/Abe6yhnxT4I

PQC TLS+ PQC 인증서 테스트

- Case 1
  - 기존 인증서(현재 사용되는 인증서) 사용+ 하이브리드 TLS
- Case 2
  - PQC 인증서 + 하이브리드 TLS
- Case 3
  - PQC 인증서 + PQC TLS

- M1 chip에서 테스트 수행
- 사전 설치 항목 : Homebrew
- liboqs와 openssl3 활용

***TLS의 경우 모두 키 교환 과정이 하이브리드 혹은 PQC를 의미**

open-quantum-safe project

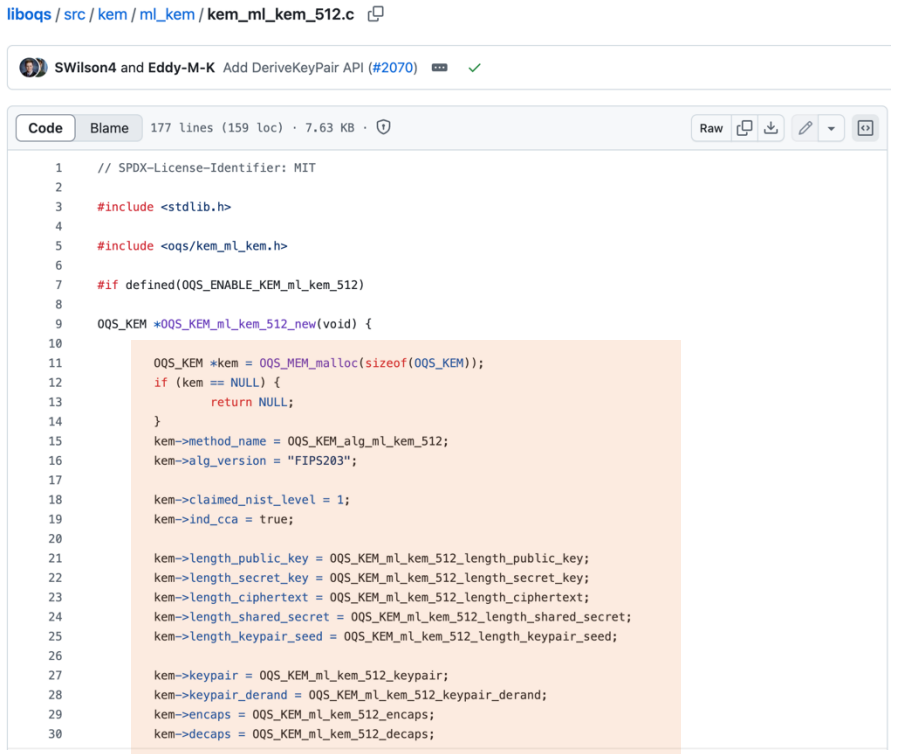
- Open Quantum Safe(OQS) 프로젝트
  - 양자 컴퓨터 시대에도 안전한 암호 알고리즘을 개발 및 프로토타이핑하고 이를 프로토콜 및 애플리케이션에 통합 지원하는 것을 목표로 함
  - Linux Foundation 산하 PQCA 프로젝트 소속
  - 구성
    - liboqs 프로젝트
    - 프로토콜과 애플리케이션에 대한 프로토타입 통합
  - 최신 업데이트 : 2025.04.17 liboqs 버전 0.13.0 출시

- liboqs
  - OQS 프로젝트 중 하나로, 양자 내성 암호 알고리즘들을 모아 제공하는 오픈 소스 라이브러리
  - PQC 알고리즘을 실제 시스템에 적용하기 위해 주로 활용됨
  - 다양한 KEM(Key Encapsulation Mechanism)과 전자서명 알고리즘에 대한 공통 API 제공
  - OpenSSL PQC 통합(OQS OpenSSL 3 Provider), SSH, VPN 등의 프로토콜 데모로 활용

liboqs

https://github.com/open-quantum-safe/liboqs

- 특징
  - 공통 API 데이터 구조 : OQS_KEM, OQS_SIG 구조체 사용
    - 공통 구조체를 사용하여 알고리즘 이름, 키 크기, 보안 수준, 함수 포인터 등을 보관
    - OQS_KEM_keypair, OQS_KEM_encaps
  - 다수의 구현체 통합
    - 공식 구현 참조, PQClean 구현 등 코드 통합
  - 테스트 및 벤치마크 지원
    - 각 알고리즘에 대한 KAT(Known Answer Test), 속도 벤치마크 코드 포함



[지원 알고리즘 목록]	KEM	DSA
NIST PQC	**Kyber**(Round 3 ver), **ML-KEM**(FIPS 203 ver) **HQC**(Round4 ver)	**Dilithium**(Round 3 ver), **Falcon,** **ML-DSA**(FIPS 204 ver), **SPHINCS+**
Additional Round2	-	**MAYO, CROSS(ver 2), UOV**
상태 기반 해시	-	**LMS, XMSS**
NIST PQC Round 4	**Classic McEliece, BIKE**	-
기타	**FrodoKEM, NTUR-Prime**	-

TLS

- Transport Layer Security
  - 컴퓨터 네트워크 상에서 안전한 통신을 보장하기 위한 암호화 프로토콜
  - 일반적으로 TCP(Transmission Control Protocol, 전송 제어 프로토콜) 위에서 동작
  - TLS 1.3은 2018년에 표준화된 최신 버전
    - 기존 버전보다 더 강화된 보안성, 지연 시간 감소, 단순화된 설정 제공
    - Client-Server 사이의 인증, 데이터 암호화, 무결성 제공

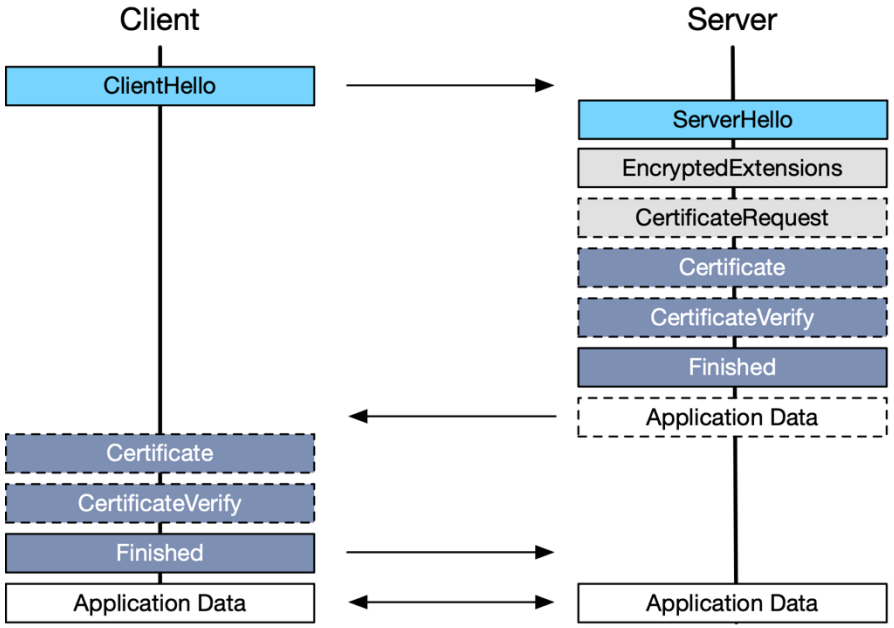


Fig. 1: TLS 1.3 Message Flow (based on RFC 8446)

Rios, Ruben, et al. "Towards the Quantum-Safe Web: Benchmarking Post-Quantum TLS." *IEEE Network* (2025).

사전 작업

1. 필요 패키지 설치
   - brew install cmake ninja openssl@3 git bc
2. Liboqs 설치

```
cd ~
# 기존이 있다면 삭제
rm -rf liboqs
git clone --recursive https://github.com/open-quantum-safe/liboqs.git
cd liboqs
cmake -GNinja \
    -DCMAKE_INSTALL_PREFIX=/usr/local \
    -DCMAKE_OSX_ARCHITECTURES=arm64 \
    -S . -B build
cmake --build build
sudo cmake --install build
```

-GNinja : Ninja 빌드 시스템 생성
-DCMAKE_INSTALL_PREFIX : make install 시 설치 경로 지정
-DCMAKE_OSX_ARCHITECTURES=arm64 : Apple Silicon 전용 컴파일
-S . -B build : 현재 소스 → build/ 폴더로 빌드 파일 생성

사전 작업

-DCMAKE_BUILD_TYPE=Release : 최적화 빌드
-DOPENSSL_ROOT_DIR=… : Homebrew OpenSSL 위치 지정
-Dliboqs_DIR=… : liboqs CMake 설정 파일 위치 지정
-DBUILD_SHARED_LIBS=ON : .dylib 형태로 빌드

3. oqs-provider 설치

```
cd ~
rm -rf oqs-provider
git clone https://github.com/open-quantum-safe/oqs-provider.git
cd oqs-provider
cmake -GNinja \
    -DCMAKE_BUILD_TYPE=Release \
    -DOPENSSL_ROOT_DIR=$(brew --prefix openssl@3) \
    -Dliboqs_DIR=/usr/local/lib/cmake/liboqs \
    -DCMAKE_OSX_ARCHITECTURES=arm64 \
    -DBUILD_SHARED_LIBS=ON \
    -S . -B build
cmake --build build
```

Case 1) 기존 인증서 사용+ 하이브리드 TLS

- P-256+ML-KEM512 키 교환(TLS 1.3)

1) 쉘 환경 설정

```
# (1) Homebrew OpenSSL 3.x 우선 호출
export PATH="$(brew --prefix openssl@3)/bin:$PATH"

# (2) oqs-provider 모듈 위치 지정(OpenSSL이 외부 provider 모듈을 찾는 경로 지정)
export OPENSSL_MODULES="$HOME/oqs-provider/build/lib”

#(3) 변경된 환경 변수 즉시 반영
source ~/.zshrc
```

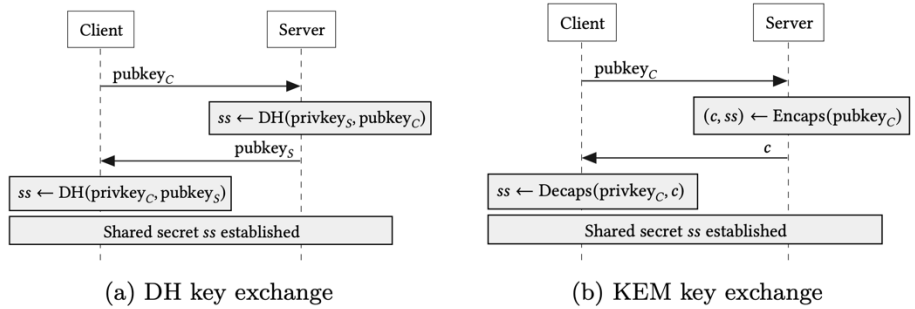


Figure 2: Key exchange diagrams

```
(base) minjoo@simminjuui-iMac oqs-provider % which openssl
/opt/homebrew/opt/openssl@3/bin/openssl
```

ALNAHAWI, Nouri, et al. A comprehensive survey on post-quantum tls. *IACR Communications in Cryptology*, 2024

Case 1) 기존 인증서 사용+ 하이브리드 TLS

2) 서버용 인증서 및 키 준비

```
cd ~

# ECDSA P-256 키·인증서 생성

openssl ecparam -name prime256v1 -genkey -noout -out server.key

openssl req -x509 -key server.key -out server.crt -nodes \

  -subj "/CN=localhost"
```

ecparam -name prime256v1 :
P-256(ECDSA) 파라미터 사용
-genkey -noout : 키만 생성(파라미터 출력 생략)
req -x509 : self-signed X.509 인증서 생성
-nodes : 키 암호화 없이 저장
-subj "/CN=localhost" : 인증서 Subject 설정

3) 벤치마크용 스크립트 생성

```
cd ~
cat << 'EOF' > bench.sh
#!/usr/bin/env bash
HOST=localhost
PORT=8443
N=200          # 반복 횟수 (원하는 만큼 조절 가능)
PROV_PATH="$HOME/oqs-provider/build/lib"

# 시작 시간
START=$(date +%s.%N)
for i in $(seq 1 $N); do
  printf " | openssl s_client \
    -connect ${HOST}:${PORT} \
    -tls1_3 \
    -groups p256_mlkem512 \
    -provider default -provider base -provider oqsprovider \
    -provider-path "${PROV_PATH}" \
    > /dev/null 2>&1
done
END=$(date +%s.%N)

# 결과 계산
ELAPSED=$(echo "$END - $START" | bc)
echo "→ $N handshakes in ${ELAPSED}s"
echo "→ Avg handshake time: $(echo "$ELAPSED / $N" | bc -l)s"
echo "→ Throughput: $(echo "$N / $ELAPSED" | bc -l) handshakes/sec"
EOF

chmod +x bench.sh
```

Case 1) 기존 인증서 사용+ 하이브리드 TLS

4) TLS 서버 띄우기(서버용 새로운 터미널)

쉘 환경 설정(앞과 동일, 새로운 터미널 켜면 무조건 수행)

```
# (1) Homebrew OpenSSL 3.x 우선 호출
export PATH="$(brew --prefix openssl@3)/bin:$PATH"

# (2) oqs-provider 모듈 위치 지정
export OPENSSL_MODULES="$HOME/oqs-provider/build/lib”
```

```
# (3) TLS 서버 터미널 동작
openssl s_server \
  -accept 8443 \
  -cert server.crt
  -key server.key \
  -www -tls1_3 \
  -groups p256_mlkem512 \
  -provider default -provider base -provider oqsprovider \
  -provider-path "$OPENSSL_MODULES"
```

```
(base) minjoo@simminjuui-iMac ~ % openssl s_server \
  -accept 8443 \
  -cert server.crt -key server.key \
  -www -tls1_3 \
  -groups p256_mlkem512 \
  -provider default -provider base -provider oqsprovider \
  -provider-path "$OPENSSL_MODULES"

Using default temp DH parameters
ACCEPT
```

```
(base) minjoo@simminjuui-iMac ~ % openssl s_server \
  -accept 8443 \
  -cert server.crt -key server.key \
  -www -tls1_3 \
  -groups p256_mlkem512 \
  -provider default -provider base -provider oqsprovider \
  -provider-path "$OPENSSL_MODULES"

s_server: unable to load provider oqsprovider
Hint: use -provider-path option or OPENSSL_MODULES environment variable.
80CC4BEF01000000:error:12800067:DSO support routines:dlfcn_load:could not load the shared library
:crypto/dso/dso_dlfcn.c:118:filename(/opt/homebrew/Cellar/openssl@3/3.4.0/lib/ossl-modules/oqspro
vider.dylib): dlopen(/opt/homebrew/Cellar/openssl@3/3.4.0/lib/ossl-modules/oqsprovider.dylib, 0x0
002): tried: '/opt/homebrew/Cellar/openssl@3/3.4.0/lib/ossl-modules/oqsprovider.dylib' (no such f
ile), '/System/Volumes/Preboot/Cryptexes/OS/opt/homebrew/Cellar/openssl@3/3.4.0/lib/ossl-modules/
oqsprovider.dylib' (no such file), '/opt/homebrew/Cellar/openssl@3/3.4.0/lib/ossl-modules/oqsprov
ider.dylib' (no such file)
80CC4BEF01000000:error:12800067:DSO support routines:DSO_load:could not load the shared library:c
rypto/dso/dso_lib.c:147:
80CC4BEF01000000:error:07880025:common libcrypto routines:provider_init:reason(37):crypto/provide
r_core.c:950:name=oqsprovider
```

Case 1) 기존 인증서 사용+ 하이브리드 TLS

5) Handshake 벤치마크 실행(클라이언트 터미널_기존 터미널)

./bench.sh

ECDSA P-256 키·인증서 생성

P-256+ML-KEM512 키 교환(TLS 1.3)

```
(base) minjoo@simminjuui-iMac ~ % openssl s_server \
  -accept 8443 \
  -cert server.crt -key server.key \
  -www -tls1_3 \
  -groups p256_mlkem512 \
  -provider default -provider base -provider oqsprovider \
  -provider-path "$OPENSSL_MODULES"

Using default temp DH parameters
ACCEPT
```

서버

```
echo "→ Avg handshake time: $(echo "$ELAPSED / $N" | bc -l)s"
echo "→ Throughput: $(echo "$N / $ELAPSED" | bc -l) handshakes/se
EOF

chmod +x bench.sh

(base) minjoo@simminjuui-iMac ~ % ./bench.sh

→ 200 handshakes in 7.571191000s
→ Avg handshake time: .037855955000000000s
→ Throughput: 26.41592320151479470006 handshakes/sec
(base) minjoo@simminjuui-iMac ~ %
```

클라이언트

Case 2) PQC 인증서 + 하이브리드 TLS

Case1의 쉘환경 설정 동일하게 수행

0) 실험용 디렉터리 생성 및 이동

```
mkdir -p ~/tls-test
cd ~/tls-test
```

1) PQC 인증서와 키 생성(mldsa44)

2)TLS 서버 실행

```
openssl s_server \
  -accept 8443 \
  -cert server.crt \
  -key server.key \
  -tls1_3 \
  -groups p256_mlkem512 \
  -provider default \
  -provider base \
  -provider oqsprovider
```

```
# ① 개인키(server.key) 생성
openssl genpkey \
  -provider default \
  -provider base \
  -provider oqsprovider \
  -algorithm mldsa44 \
  -out server.key

# ② Self-signed 인증서(server.crt) 발급 (유효기간 1년)
openssl req -new -x509 \
  -provider default \
  -provider base \
  -provider oqsprovider \
  -key server.key \
  -out server.crt \
  -days 365 -nodes \
  -subj "/C=KR/ST=Seoul/L=Seoul/O=MyOrg/OU=IT/CN=localhost"
```

-accept 8443 : 8443 포트 대기

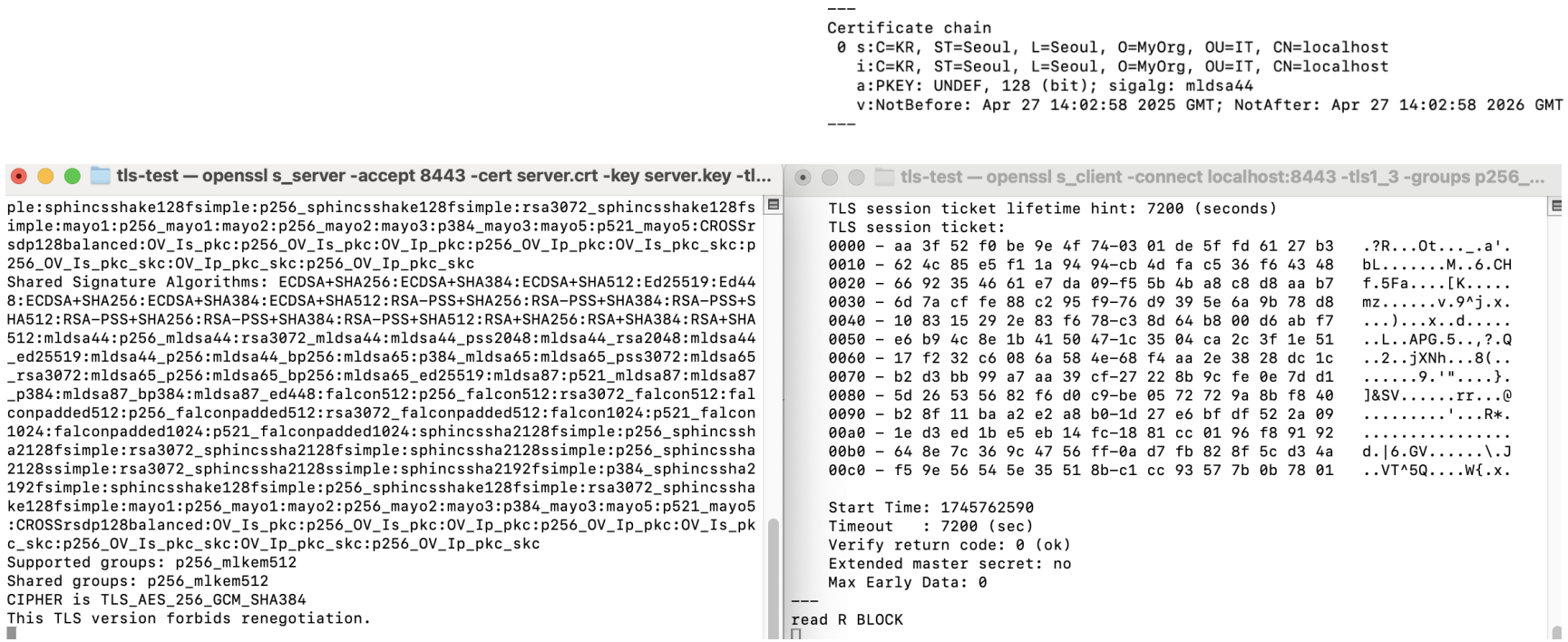
-groups p256_mlkem512 : P-256 + Kyber512 하이브리드 KEM

oqsprovider 로딩으로 Kyber·mldsa44 동작

Case 2) PQC 인증서 + 하이브리드 TLS

[클라이언트 터미널]
3) 핸드쉐이크 기능 검증

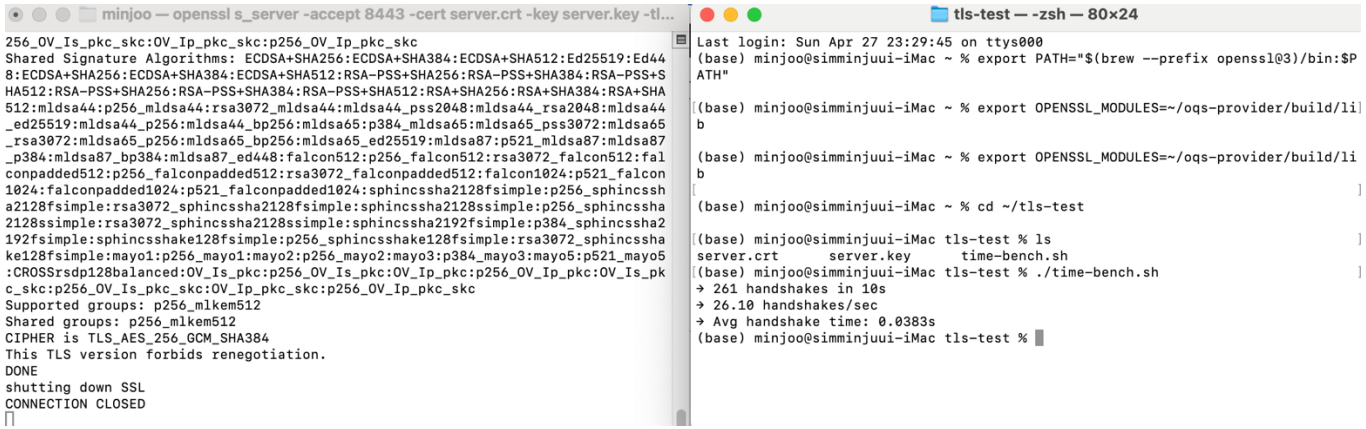
```
cd ~/tls-test

openssl s_client \
  -connect localhost:8443 \
  -tls1_3 \
  -groups p256_mlkem512 \
  -provider default \
  -provider base \
  -provider oqsprovider \
  -CAfile server.crt \
  -msg
```



-groups p256_mlkem512 : ClientHello 에 P-256+Kyber512 제안 (키교환만 하이브리드)
-CAfile server.crt : Self-signed 인증서 신뢰
-msg : 메시지 레벨 로그 출력

Case 2) PQC 인증서 + 하이브리드 TLS

- 10초 동안 몇번 핸드쉐이크가 돌아가는지 확인




```
cat > ~/tls-test/time-bench.sh << 'EOF'
#!/usr/bin/env bash
HOST=localhost
PORT=8443
DURATION=10                    # 측정 시간(초)
PROV_PATH="$HOME/oqs-provider/build/lib"

# 환경 체크
export PATH="$(brew --prefix openssl@3)/bin:$PATH"
export OPENSSL_MODULES="$PROV_PATH"

START_TS=$(date +%s)
END_TS=$((START_TS + DURATION))
COUNT=0

while [ "$(date +%s)" -lt "$END_TS" ]; do
  # 빈 줄 입력 → 핸드셰이크. 출력 모두 버림
  printf '' | openssl s_client \
    -connect ${HOST}:${PORT} \
    -tls1_3 \
    -groups p256_mlkem512 \
    -provider default -provider base -provider oqsprovider \
    -provider-path "${PROV_PATH}" \
    -CAfile server.crt \
    > /dev/null 2>&1
  COUNT=$((COUNT + 1))
done

echo "→ $COUNT handshakes in ${DURATION}s"
printf "→ %.2f handshakes/sec\n" "$(bc -l <<< "$COUNT / $DURATION")"
printf "→ Avg handshake time: %.4fs\n" "$(bc -l <<< "$DURATION /
$COUNT")"
EOF

chmod +x ~/tls-test/time-bench.sh
```

Case 3) PQC 인증서 + PQC TLS

0. Case1의 쉘환경 설정 동일하게 수행

Cas2의 실험용 디렉터리로이동

1. PQCC 서명용 개인키(Falcon512 생성) 및 인증서 생성

```
openssl genpkey \
  -provider default \
  -provider base \
  -provider oqsprovider \
  -algorithm falcon512 \
  -out server.key
```

```
openssl req -new -x509 \
  -provider default \
  -provider base \
  -provider oqsprovider \
  -key server.key \
  -out server.crt \
  -days 365 \
  -subj "/CN=localhost"
```

Case 3) PQC 인증서 + PQC TLS

2. 서버 실행(순수 ML-KEM512-only)

```
-accept 8443 \
 -cert server.crt \
 -key server.key \
 -tls1_3 \
 -groups mlkem512 \
 -provider default \
 -provider base \
 -provider oqsprovider \
 -provider-path $PROV_PATH \
 -www
```

키 교환(KEM): Kyber512 (mlkem512)
인증서 서명: Falcon512

Case 3) PQC 인증서 + PQC TLS

[서버]

3. 단일 핸드쉐이크

```
openssl s_client \
  -connect localhost:8443 \
  -tls1_3 \
  -groups mlkem512 \
  -provider default \
  -provider base \
  -provider oqsprovider \
  -provider-path $PROV_PATH
```

```
read R BLOCK
GET / HTTP/1.0
Host: localhost
<빈 줄>
HTTP/1.0 200 ok
Content-type: text/html

<HTML><BODY BGCOLOR="#ffffff">
<pre>

s_server -accept 8443 -cert server.crt -key server.key -tls1_3 -groups mlkem512
-provider default -provider base -provider oqsprovider -provider-path /Users/min
joo/oqs-provider/build/lib -www
This TLS version forbids renegotiation.
```

입력하면 아래와 같이 나옴

```
Supported groups: mlkem512
Shared groups: mlkem512
---
New, TLSv1.3, Cipher is TLS_AES_256_GCM_SHA384
SSL-Session:
    Protocol  : TLSv1.3
    Cipher    : TLS_AES_256_GCM_SHA384
    Session-ID: 3BC113F5764913F22BDA09945AC63AC75EC399FABFCBEFB78B2E63524FADD384
    Session-ID-ctx: 01000000
    Resumption PSK: DFB39D651032A1A0CEDF987431DAE2B3B9D3B57CBB7640D9A9C6239B0441
6F2CA0FC02CAB4398233FEF9FD78EFA5093B
    PSK identity: None
    PSK identity hint: None
    SRP username: None
    Start Time: 1745764946
    Timeout   : 7200 (sec)
    Verify return code: 0 (ok)
    Extended master secret: no
```

Case 3) PQC 인증서 + PQC TLS

[서버]

4. 100회 핸드쉐이크

```
chmod +x bench_loop_100.sh
bash bench_loop_100.sh

✔ 성공 연결: 100 / 100
⏱️ 총 소요 시간: 2.968213000s
⚡ 처리량: 33.69 connections/sec
⏳ 평균 Latency: 20.00 ms
```

```
cat > bench_loop_100.sh << 'EOF'
#!/usr/bin/env bash

export PATH="$(brew --prefix openssl@3)/bin:$PATH"
export OPENSSL_MODULES=~/oqs-provider/build/lib
export PROV_PATH=~/oqs-provider/build/lib

N=100
START=$(date +%s.%N)
SUCCESS=0

# POSIX 방식 for 루프
for i in $(seq 1 $N); do
  if openssl s_client \
      -connect localhost:8443 \
      -tls1_3 \
      -groups mlkem512 \
      -provider default -provider base -provider oqsprovider \
      -provider-path $PROV_PATH \
      < /dev/null \
      > /dev/null 2>&1; then
    SUCCESS=$((SUCCESS+1))
  fi
done

END=$(date +%s.%N)
ELAPSED=$(echo "$END - $START" | bc)
TPS=$(echo "scale=2; $SUCCESS / $ELAPSED" | bc)
AVG_MS=$(echo "scale=2; ($ELAPSED / $SUCCESS) * 1000" | bc)

echo "✔ 성공 연결: $SUCCESS / $N"
echo "⏱️ 총 소요 시간: ${ELAPSED}s"
echo "⚡ 처리량: ${TPS} connections/sec"
echo "⏳ 평균 Latency: ${AVG_MS} ms"
EOF

chmod +x bench_loop_100.sh
bash bench_loop_100.sh
```

향후 진행 계획

- 현재 liboqs에 KpqC 알고리즘 4종 포팅 중
- 이번 세미나에서 진행한 테스트를 수행하기 위해서는 openssl3에도 KpqC를 포팅시켜야함

- **따라서,**

1) KpqC 알고리즘 포팅 수행

2) liboqs 알고리즘 성능 측정하는 방법을 사용해서 포팅의 정확도 확인 먼저 수행

3) OpenSSL 3에 KpqC 포팅 수행

4) 이번 세미나에서 수행한 테스트를 동일하게 적용 예정

Q & A