

연구장비성능평가 절차서: PE-OCT-001-2025

공간섭단층영상 장비의 해상도 및 민감도 성능평가 절차서
– Test Procedure for Resolution and Sensitivity Evaluation
of Optical Coherence Tomography (OCT) –

KRISS	연구장비 성능평가 절차서	절차서 등록번호	PE-OCT-001-2025
	공간섭단층영상 장비의 해상도 및 민감도 성능평가 절차서	제·개정번호	01
		제정일	2025.08.13
		최종 개정·확인일	2025.08.13

절차서 담당부서 : 의료융합측정그룹

절차서 작성자 : 조한샘

제·개정 이력 내역 (절차서의 제정/개정/확인 내역을 표 안에 작성)

구분	제·개정번호	최종 개정·확인일자	제·개정 내용 요약
제정	01	2025. 08. 13	ISO/IEC 17025의 요건에 따라 제정

절차서 목차

1. 적용범위	1
2. 인용표준	1
3. 용어의 정의	1
4. 시험내용	6
5. 준비사항	11
6. 소요장비 명세	11
7. 시험방법	14
8. 평가불확도 산정	23
9. 평가결과서 작성방법	33
10. 유효성 검증방법	33
11. 기타	34
[별첨 1] 연구장비성능평가 결과서 예시	35
[별첨 2] 연구장비성능평가 결과서 표지 예시	37

KRISS	연구장비 성능평가 절차서	절차서 등록번호	PE-OCT-001-2025
	공간섭단층영상 장비의 해상도 및 민감도 성능평가 절차서	제·개정번호	01
		제정일	2025.08.13
		최종 개정·확인일	2025.08.13

1. 적용범위

이 절차서는 공간섭단층촬영(Optical Coherence Tomography: OCT) 장비의 해상도(resolution) 과 민감도(sensitivity) 성능평가에 적용한다.

2. 인용표준

- [1] ISO/IEC 17025:2017, General requirements for the competence of testing and calibration laboratories
- [2] ISO/IEC Guide 98-3:2008 (GUM 1995), Uncertainty of measurement – Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement
- [3] ISO 13694:2018 Optics and photonics – Lasers and laser-related equipment – Test methods for laser beam power (energy) density distribution
- [4] ISO 11146-1:2021, Lasers and laser-related equipment – Test methods for laser beam widths, divergence angles and beam propagation ratios – Part 1: Stigmatic and simple astigmatic beams
- [5] 한국표준과학연구원, 측정불확도 표현 지침, KRISS/SP-2010-105, 2010

3. 용어의 정의

3.1 A-scan

측정대상 시료/시편 표면의 임의 위치(x,y,z=0)를 기준으로 깊이 방향(z축) 후방산란광(backscattered light) 정보를 획득하는 과정 또는 이를 통해 얻어지는 1차원 좌표 매핑 광신호로, 동상, 결맞음 길이(coherence length)가 짧은 공간섭 신호원의 깊이를 시간적으로 스캔하거나, 넓은 파장 대역을 갖는 광원에서 시간 또는 파장에 따라 수집된 간섭 신호를 푸리에 변환하는 방식으로 구현됨.

3.2 B-scan

시편 깊이 방향 (z축) 또는 광축 (optical axis)에 수직인 횡방향(x축)으로 A-scan 측정 위치를 스캔하는 과정 및 이를 통해 획득된 일련의 A-scan 신호를 병합함으로써 얻어지는 2차원 XZ 단면 영상으로서, 시료 및 조직의 내부 구조를 시각화는 OCT의 대표적 영상 형식.

3.3 En-face

시료.시편의 특정 깊이(z축)에 위치한 가상의 XY 평면 상으로 투영된 시료 단면 영상.

3.4 ESF (Edge Spread Function)

영상화 시스템에서 이상적인 날카로운 엣지(edge)를 촬영했을 때, 공간 좌표(x)에 따른 정규

KRISs	연구장비 성능평가 절차서	절차서 등록번호	PE-OCT-001-2025
	공간섭단층영상 장비의	제·개정번호	01
	해상도 및 민감도 성능평가 절차서	제정일	2025.08.13
		최종 개정·확인일	2025.08.13

화된 강도(Intensity) 변화를 나타내는 함수로, 엣지를 가로지르는 방향의 intensity profile을 표현한다. ESF는 시스템의 PSF (Point Spread Function)를 적분한 형태이며, PSF가 가우시안 분포를 따르는 경우 ESF는 오차함수(erf) 형태가 된다. 엣지의 10~90% 전이 구간 길이는 PSF의 FWHM과 일정한 비례관계를 가지며, 이를 통해 횡방향 해상도를 산출할 수 있다.

3.5 FWHM (Full Width at Half Maximum)

시간적/공간적으로 국소화(localized)된 함수 또는 신호에 대한 시간폭/너비를 정량화하는 수치로서, 해당 함수 또는 신호의 최대값 (maximum)과 대비해 절반 레벨 (50 %)의 값을 나타내는 두 시간적/공간적 좌표 간의 폭으로 정의됨. 본 절차서의 경우, PSF (Point Spread Function)의 폭이나 해상도를 평가하는 데 사용됨.

3.6 ND (Neutral Density) 필터

광 세기를 모든 파장 영역에서 균일하게 감쇠시키는 필터. 센서 포화 방지 및 민감도 조절을 위한 광학 제어에 사용됨.

3.7 OCT (Optical Coherence Tomography)

광 간섭 신호를 기반으로 생체조직이나 재료에 조사된 빛의 후방산란 신호를 수집·처리함으로써 시료의 내부 구조를 고해상도로 획득하는 비침습적 광학 단층 영상 기술. 대역폭이 넓은 광원과 샘플암 (sample arm)과 기준암 (reference arm)로 구성된 간섭계 및 빔 스캐너 광학계를 갖는 특징이 있음.

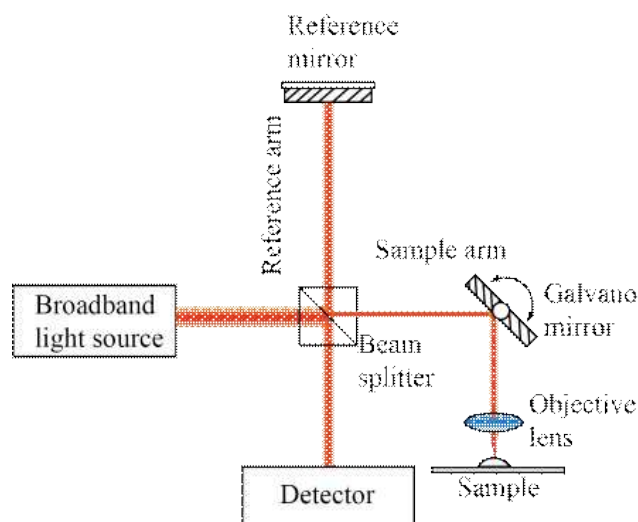


그림 1 OCT 시스템 구성도 예시

KRISS	연구장비 성능평가 절차서	절차서 등록번호	PE-OCT-001-2025
	공간섭단층영상 장비의	제·개정번호	01
	해상도 및 민감도 성능평가 절차서	제정일	2025.08.13
		최종 개정·확인일	2025.08.13

3.8 PSF (Point Spread Function)

이상적인 점 광원이 영상화 시스템을 통과했을 때 발생하는 공간적 퍼짐 양상을 나타내는 함수. 광학 이미징의 공간 분해능(해상도) 및 영상 품질을 평가하는 핵심 도구임.

3.9 RMS 반경 (Root Mean Square Radius)

광의 에너지 또는 강도 분포가 평균적으로 중심으로부터 얼마나 퍼져 있는지를 나타내는 지표. 단순히 최대 반경 또는 문턱치 반경이 아니라, 광 에너지 공간분포 함수로부터 수학적으로 산출되는 평균적인 광 퍼짐 정도.

$$w_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{\iint I(x,y) \cdot r^2 dx dy}{\iint I(x,y) dx dy}}$$

$I(x,y)$: (x,y) 에서의 광 강도, $r = \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}$: (x_0,y_0) 으로부터의 거리

3.10 Roll-off

OCT 시스템에서 측정할 수 있는 신호의 세기가 깊이에 따라 얼마나 감소하는지를 나타내는 특성. 깊이에 따른 광신호 감쇠 정도를 나타내는 값.

3.11 SNR (Signal-to-Noise Ratio)

신호 세기 대 잡음 세기의 비율. 보편적으로 데시벨 (dB) 단위의 로그 스케일로 표현됨.

3.12 VOA (Variable Optical Attenuator)

광 세기를 조절하기 위한 광 가변 감쇠기.

3.13 가우시안 함수 (Gaussian function)

확률 및 물리 현상에서 널리 사용되는 함수 형태로, 평균값을 중심으로 대칭적이며 종 모양의 곡선을 가짐.

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right)$$

여기서 μ 는 평균(peak 위치), σ 는 표준편차(폭)를 의미함.

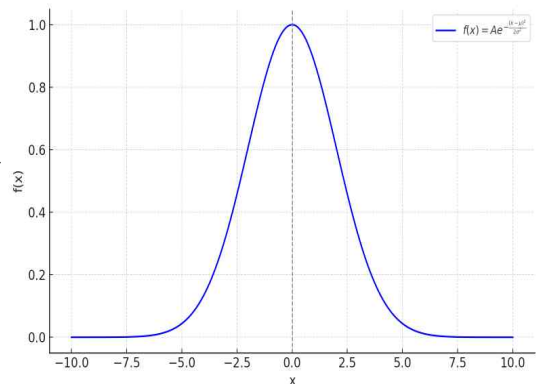


그림 2 가우시안 분포 그래프

KRISS	연구장비 성능평가 절차서	절차서 등록번호	PE-OCT-001-2025
	공간섭단층영상 장비의	제·개정번호	01
	해상도 및 민감도 성능평가 절차서	제정일	2025.08.13
		최종 개정·확인일	2025.08.13

3.14 개구수(Numerical Aperture, NA)

광학 시스템의 집광 능력을 나타내는 값으로써 다음 식으로 주어짐. 이미징 시스템의 횡방향 해상도(공간 분해능)와 밀접한 관련이 있음.

$$NA = n \sin\theta$$

(n : 물체 공간의 굴절률, θ : 대물렌즈 광 집속/수집 최대각)

3.15 광 세기 (Intensity)

단위 면적당 전달되는 광 에너지 또는 광 검출기에 수신되는 신호의 세기 또는 강도.

3.16 굴절률 (Refractive Index)

빛이 어떤 매질을 통과할 때, 진공 중에서의 빛의 속도에 비해 해당 매질에서 얼마나 느리게 진행되는지를 나타내는 비율.

3.17 기준암 (Reference Arm)

OCT 간섭계를 구성하는 빔 경로 중 하나로 기준 거울(reference mirror)과 같은 반사체가 배치되어 있으며, 샘플암에서 반사된 빛과 간섭 신호를 생성.

3.18 대물렌즈 (Objective Lens)

시료에 가장 가까운 위치에서 광을 집속하거나 수집하는 광학 렌즈.

3.19 도심 (Centroid)

스펙트럼의 세기를 가중치로 하여 계산된 중심값으로, 중심 파장을 정의하는데 사용됨.

3.20 레일리 분포 (Rayleigh Distribution)

복소 가우시안 노이즈의 실수부와 허수부가 각각 독립적인 가우시안(정규) 분포를 따를 때, 이들의 진폭이 따르게 되는 확률 분포. 특히 복소 가우시안 노이즈의 진폭은 레일리 분포 형태를 가짐. 0부터 시작하여 특정 값을 중심으로 봉우리(최빈값)를 가지며, 이후 점점 감소하는 형태의 비대칭 분포 형태를 가짐.

3.21 민감도 (Sensitivity)

시스템이 감지 가능한 최소 반사 신호의 세기로, 일반적으로 최대 반사 신호에 해당하는 이상적인 반사체(예: 은 코팅 거울 등)로 근사하여 측정된 SNR(Signal-to-Noise Ratio)로 표현됨.

KRISs	연구장비 성능평가 절차서	절차서 등록번호	PE-OCT-001-2025
		제·개정번호	01
	공간섭단층영상 장비의	제정일	2025.08.13
	해상도 및 민감도 성능평가 절차서	최종 개정·확인일	2025.08.13

3.22 방사형 스캔 (Radial Scan)

중심점에서 방사형으로 여러 방향으로 스캔하는 방식.

3.23 보간 (Interpolation)

불균일하게 샘플링된 데이터를 일정 간격으로 재구성하기 위한 수치 기법. (예: 선형 보간, 큐빅 보간)

3.24 빔 웨이스트 (Beam Waist)

가우시안 빔의 중심축($z = 0$)에서, 세기가 최대값의 $1/e^2$ 로 감소하는 지점까지의 반경.

3.25 샘플암 (Sample Arm)

OCT 간섭계를 구성하는 빔 경로 중 하나로, 실제 측정 대상(샘플)에 도달하는 광 경로를 의미함.

3.26 선형 회귀 (Linear Regression)

두 측정 변수 간의 관계가 선형적으로 변화한다고 가정하고, 이를 직선의 방정식 형태로 모델링하는 통계적 분석 기법.

3.27 스위프 (Sweep)

광원의 파장 또는 스캐닝 위치 등을 시간에 따라 연속적으로 변화시키는 동작을 의미함. (예: 파장 스위프(frequency sweep))

3.28 스펙트럼 (Spectrum)

파장 또는 파수에 따른 광원의 세기 분포.

3.29 유효 감지 깊이 (Effective Imaging Depth)

깊이에 따른 신호 감쇠 특성을 나타내는 척도로써, 신호가 기준값 대비 특정 임계값 (예: -6dB, -10dB 등) 이하로 감소하는 깊이까지의 범위.

3.30 중심 파장 (Center Wavelength)

광원의 스펙트럼에서 에너지 중심을 나타내는 파장. 보통 도심 (centroid) 방식으로 계산됨.

KRISs	연구장비 성능평가 절차서	절차서 등록번호	PE-OCT-001-2025
	공간섭단층영상 장비의	제·개정번호	01
	해상도 및 민감도 성능평가 절차서	제정일	2025.08.13
		최종 개정·확인일	2025.08.13

3.31 초점 평면 (Focal Plane)

렌즈 또는 광학계에서 광이 가장 잘 수렴되어 초점이 맺히는 평면.

3.32 축방향 해상도 (Axial Resolution)

광학적으로 물점(object point) 간 구분이 가능한 빔의 진행 방향(깊이 방향)으로의 최소 거리. OCT의 경우, 광원의 중심 파장과 파장 대역폭에 의해 결정됨.

3.33 파수 (wavenumber, k)

단위 길이당 파동이 몇 라디안을 진행하는지 나타내는 물리량. 파장의 역수로 정의되며

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \text{로 표현됨.}$$

3.34 푸리에 변환 (Fourier Transform)

시간이나 공간 영역의 신호를 주파수 성분으로 변환하는 수학적 도구. OCT 기술 구현에서는 간섭 신호를 깊이 프로파일로 변환하는 데 사용됨.

3.35 횡방향 해상도 (Transverse Resolution)

빛의 진행 방향에 수직인 평면상에서 구분할 수 있는 물점 간 구분이 가능한 최소 거리. OCT에서는 렌즈의 개구수(NA)와 중심 파장에 의해 결정됨.

4. 시험내용

본 시험은 OCT 장비의 주요 성능지표인 축방향 해상도, 횡방향 해상도 및 민감도를 정량적으로 평가하기 위한 것으로, 항목별로 측정 원리 및 측정 방법을 다음과 같이 정의한다.

4.1 축방향 해상도 (Axial Resolution)

4.1.1 측정 원리

OCT의 축방향 해상도는 서로 다른 깊이에서 반사된 빛을 구분할 수 있는 능력으로 광원의 스펙트럼 정보에 의해 결정된다. 따라서, 이론적 축방향 해상도를 산출하고자 하면 광원의 스펙트럼을 측정할 수 있는 광스펙트럼 분석기(Optical Spectrum Analyzer, OSA)가 필요하다. 가우시안(Gaussian) 스펙트럼을 갖는 광원의 축방향 해상도는 광원의 중심 파장과 광원의 대역폭으로 구성된 식 (1)로 정의된다.

KRISs	연구장비 성능평가 절차서	절차서 등록번호	PE-OCT-001-2025
	공간섭단층영상 장비의	제·개정번호	01
	해상도 및 민감도 성능평가 절차서	제정일	2025.08.13
		최종 개정·확인일	2025.08.13

$$\Delta z = \frac{2\ln 2}{\pi} \frac{\lambda_0^2}{\Delta \lambda} \quad (1)$$

(Δz : 축방향 해상도, λ_0 : 중심 파장 [nm], $\Delta \lambda$: 광원의 대역폭 [nm])

광원의 중심 파장은 스펙트럼의 에너지 도심(centroid)을 의미하며, 일반적으로 식 (2)와 같이 각 파장에서의 세기를 가중치로 하여 구해진 광원 구성 파장의 평균값이다.

$$\lambda_0 = \frac{\sum (\lambda_i \times S(\lambda_i))}{\sum \lambda_i} \quad (2)$$

(λ_0 : 중심 파장 [nm], λ_i : 스펙트럼 내 i 번째 데이터 포인트에 해당하는 파장값 [nm], $S(\lambda_i)$: 해당 파장(λ_i)에서의 스펙트럼 세기)

광원의 대역폭은 일반적으로 FWHM(Full Width at Half Maximum) 방식으로 산출한다. 먼저 측정된 스펙트럼에서 최대 세기를 찾은 뒤, 그 절반 값(half maximum)에 해당하는 세기를 기준으로 양측의 파장값을 결정한다. FWHM 방식으로 산출하며, 식 (3)과 같이, 최대 세기의 절반 값을 기준으로 좌우의 파장 차이를 계산한다.

$$\Delta \lambda = |\lambda_r - \lambda_l| \quad (3)$$

(λ_r, λ_l : 최대 세기의 절반에 해당하는 오른쪽 파장과 왼쪽 파장)

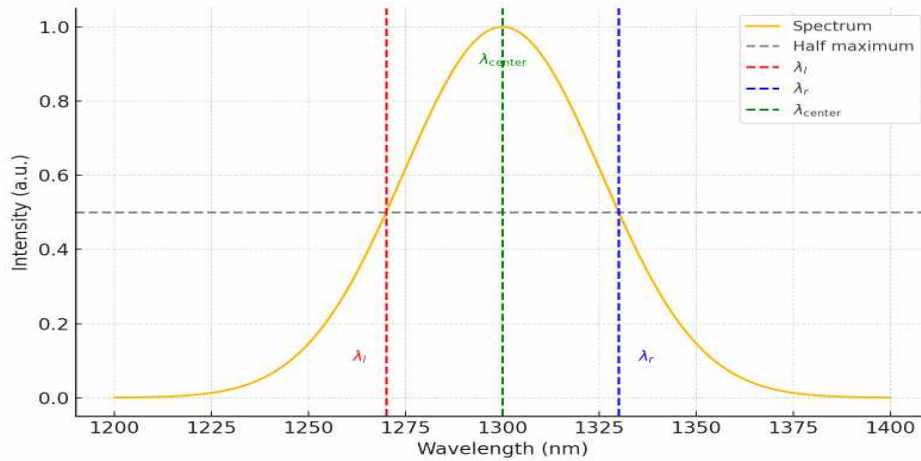


그림 3 OCT 광원 스펙트럼에서의 중심파장 및 FWHM 방식의 대역폭 정의
광원 스펙트럼이 비대칭이거나 멀티 피크가 존재하는 비가우시안(non-Gaussian) 형태인 경우, OCT의 축방향 해상도(Δz)는 식 (4)와 같이 파수(wavenumber) 스펙트럼의 푸리에 변환(Fourier Transform, FT)을 통해 얻은 $|FT\{S(k)\}|$ 의 FWHM으로 주어진다.

$$\Delta z = \text{FWHM of } |FT\{S(k)\}| \quad (4)$$

(Δz : 축방향 해상도 [nm], $S(k)$: 파수 스펙트럼 ($k = \frac{2\pi}{\lambda}$))

KRISs	연구장비 성능평가 절차서	절차서 등록번호	PE-OCT-001-2025
		제·개정번호	01
	공간섭단층영상 장비의	제정일	2025.08.13
	해상도 및 민감도 성능평가 절차서	최종 개정·확인일	2025.08.13

OSA로 획득한 파장 영역 스펙트럼($S(\lambda)$) 데이터를 이 식에 적용하기 위해서는 파수 도메인으로 변환되어야 한다. 또한, 일반적으로 OSA의 출력 데이터는 파장 기준으로 비등간격 샘플링되기 때문에, 이를 등간격 파수(k) 축으로 보간(interpolation)하는 과정이 필요하다. 보간된 $S(k)$ 데이터에는 푸리에 변환을 적용하기 전, Gibbs 현상을 줄이고 스펙트럼 누출(spectral leakage)을 균일화 하기 위해 Hann, Hamming, Kaiser 등의 윈도우 함수로 정규화하는 것이 바람직하다. 또한, 정확한 측정을 위해 공간 해상도를 높이려면 윈도우 함수 적용 후 파수 도메인에 0을 다수 추가하는 제로 패딩(zero padding) 방법을 사용할 수 있다. $\lambda \rightarrow k$ 변환 후 등간격 보간과 윈도우 함수 적용을 거쳐 푸리에 변환을 수행하면 깊이 응답 신호 PSF(z)를 얻을 수 있으며, 이 PSF의 FWHM을 기준으로 OCT의 축방향 해상도를 평가한다. 스펙트럼의 가우시안과 비가우시안 구분은 본 절차서 11.1의 지표들을 기준을 기반으로 통합적으로 판별하는 것을 권장한다.

4.1.2 측정 방법

우선, OSA를 이용해 측정한 광원 스펙트럼과 해당 분석 정보를 앞서 제시한 OCT 축방향 해상도 계산식에 대입하면 시험대상 장비의 축방향 해상도에 대한 이론적 한계 추정이 가능하다. 실제 OCT 시스템의 축방향 해상도에 대한 ‘실험적’ 평가는, 단일 반사면을 가지는 평면거울을 샘플로 사용해 A-scan 신호를 취득한 후 반사 표면 기원 진폭 신호의 PSF의 FWHM을 측정함으로써 이루어진다.

4.2 횡방향 해상도 (Transverse Resolution)

4.2.1 측정 원리

OCT 시스템의 횡방향 해상도는 동일 깊이 평면상에서 인접한 두 구조를 구분할 수 있는 능력으로, 이론상 중심 파장과 샘플링 대물렌즈의 개구수(Numerical Aperture, NA)에 의해 결정되며 식 (5)와 같이 표현된다.

$$\Delta x = \zeta \frac{\lambda_0}{NA} \quad (5)$$

(Δx : 횡방향 해상도, λ_0 : 중심 파장 [nm], ζ : 해상도 정의 기준에 따른 계수)

여기서 ζ 는 해상도 정의 방식에 따라 선택되며, 본 절차서에서는 아래의 두 가지 경우를 고려한다.

1) $\zeta = 0.61$: 회절 한계를 기준으로 하는 경우이며, 원형 개구로 형성되는 Airy disk의 첫 번째 최소점을 기준으로 해상도를 정의한다. 주로 이론적 한계를 제시하거나 공초점 현미경 분

KRISs	연구장비 성능평가 절차서	절차서 등록번호	PE-OCT-001-2025
	공간섭단층영상 장비의	제·개정번호	01
	해상도 및 민감도 성능평가 절차서	제정일	2025.08.13
		최종 개정·확인일	2025.08.13

석 등에 사용된다. (비가우시안 빔 중에 이 조건을 충족하지 못하는 경우에는 이론식 기반 해상도 방식 적용이 현실적으로 어렵고, ESF를 측정하고 미분하여 LSF (Line Spread Function)의 FWHM을 직접 측정하는 방식을 권장한다.)

2) $\zeta = 0.37$: 가우시안 형태의 빔에서 PSF의 FWHM을 기준으로 정의하는 경우이며, OCT 시스템에서는 실제 측정된 PSF 프로파일의 폭을 기준으로 해상도를 정의할 때 주로 사용된다. (참고: 단일모드 광섬유로부터 출력되는 빔은 공초점 편홀과 유사한 역할을 하지만, 그 모드 필드 분포는 엄밀히 가우시안이 아니라 $LP_{0,1}$ 모드 (1종 Bessel 함수 형태)를 따른다. 따라서 본 절차서에서는 가우시안 근사를 적용하되, 이는 근사적 모델임을 명시한다.)

두 값은 해상도에 대한 정의 기준이 다르므로 직접적으로 상응하는 개념은 아니며, 해상도 평가 목적에 따라 적절한 기준을 선택해야 한다.

NA는 횡방향 해상도를 결정짓는 주요 파라미터로, 초점면에서 빔 수렴 각도와 광학 매질의 굴절률에 따라 식 (6)과 같이 정의된다.

$$NA = n \sin(\theta) \quad (6)$$

(n : 샘플 주변 매질의 굴절률, θ : 초점에서의 반각(focus half-angle))

다만, 비균일 강도 분포를 갖는 측정 빔에 대해 초점 반각 θ 를 직접 산출하기는 실질적으로 어렵기 때문에, 다음과 같이 NA를 산정한다. 대부분의 OCT 장비에 적용되는 가우시안 빔의 경우, 초점에서의 빔 반경이 명확하게 정의되며, 레일리 범위 (Rayleigh range) 및 빔 사이즈 변화도 이론적으로 모델링이 가능하다. 이 경우, NA는 다음 식 (7)과 같이 근사할 수 있다:

$$NA \approx \frac{\lambda_0}{\pi \cdot w_0} \quad (7)$$

(λ_0 : 중심 파장, w_0 : 초점에서의 빔 반경)

이 식은 이상적인 가우시안 빔의 전파 특성에서 유도된 공식이며, 초점에서의 빔 반경을 측정하여 NA를 계산하는 것이 가능하다.

본 절차서에서는 해상도 산출 시 측정된 빔 프로파일의 형태에 따라 다음과 같이 가우시안 빔과 비가우시안 빔으로 구분할 수 있다.

- 가우시안 빔으로 간주하는 경우: 빔 프로파일이 축 대칭적이며 Gaussian fitting 결정계수 (R^2)가 0.95 이상인 경우

- 비가우시안 빔으로 간주하는 경우: 빔 프로파일에서 Gaussian fitting의 적합도가 낮거나, 링 구조 등 비가우시안 특성이 관찰되는 경우

KRISs	연구장비 성능평가 절차서	절차서 등록번호	PE-OCT-001-2025
	공간섭단층영상 장비의 해상도 및 민감도 성능평가 절차서	제·개정번호	01
		제정일	2025.08.13
		최종 개정·확인일	2025.08.13

4.2.2 측정 방법

샘플암으로부터 자유공간으로 출력되는 빔을 ‘빔 프로파일러’를 이용해 광축 (Z축)을 따라 등간격으로 빔 프로파일 데이터 $I(x,y;z)$ 를 측정하고, 각 위치에서 획득된 빔 프로파일 데이터를 기반으로 NA를 산출한다. 중심 파장은 OSA로 측정된 스펙트럼으로부터 계산되며, 이론적인 OCT의 횡방향 해상도는 중심 파장과 NA를 이용해 도출된다. 실제 횡방향 해상도는 금속 엣지(edge) 패턴이 포함된 해상도 타겟(resolution target)을 이용하여 OCT B-scan 영상을 취득한 후, 빔의 진행 방향에 수직인 x축 단면상의 intensity profile을 추출하여, 적절한 smoothing 및 보간을 수행한 뒤, 엣지 부분이 얼마나 퍼지는지를 측정하여 산출한다.

4.3 민감도 (Sensitivity)

4.3.1 측정 원리

민감도는 OCT 장비가 미약한 반사 신호를 얼마나 예민하게 감지할 수 있는지를 나타내는 성능 지표로, 일반적으로 최대 반사 신호에 해당하는 이상적 반사체로 근사하여 측정한 신호 대잡음비(SNR, Signal-to-Noise Ratio)를 통해 정량화할 수 있다. OCT에서 SNR은 다음과 같은 식 (9)로 표현된다.

$$SNR = 20\log_{10}\left(\frac{S}{\sigma}\right) \quad (9)$$

(S : 반사 신호의 피크 intensity σ : 노이즈 구간에서의 intensity의 표준편차)

이때의 노이즈는 샘플암의 광을 차단한 상태에서 측정된 배경 잡음(background noise)이며, 레일리 분포(Rayleigh distribution) 특성을 갖는 복소 가우시안 노이즈의 magnitude로부터 유도된다. 이에 따라 실제 SNR은 과대 평가될 수 있다. 따라서 이에 따라 보정 여부를 명확히 표기하도록 한다.

4.3.2 측정방법

단일 반사면을 갖는 평면거울을 샘플암에 장착한 후 기준암과 샘플암의 광 경로 차이가 0이 되도록 정렬된 상태로 만든다. 측정에 앞서 기준암의 파워를 단계적으로 변화시키며 각 조건에서 평균 A-scan 신호와 배경 잡음을 바탕으로 SNR을 계산하고, SNR이 최대가 되는 기준암 파워를 선정한다. 기준암과 샘플암의 광 경로 차이가 0인 지점부터 SNR을 측정한다. 마지막으로 샘플암의 거울을 일정한 깊이 간격으로 이동시키며 각 위치에서 SNR을 측정하고, 이를 통해 깊이에 따른 신호 감쇠(Roll-off) 곡선을 작성하여 유효 감지 깊이를 산출한다.

KRISs	연구장비 성능평가 절차서	절차서 등록번호	PE-OCT-001-2025
	공간섭단층영상 장비의	제·개정번호	01
	해상도 및 민감도 성능평가 절차서	제정일	2025.08.13
		최종 개정·확인일	2025.08.13

5. 준비사항

- 5.1 OCT 시스템은 안정적으로 이미지를 획득할 수 있는 상태로 예열 및 정렬되어야 한다. **이때**, 장비 제조사에서 별도의 권장 예열 시간이 있는 경우 해당 지침을 우선 적용한다. 최종적으로 광원의 출력 변동이 5% 이하이고, 중심 파장 변동이 ± 0.1 nm 이하로 안정화되었을 때 측정을 개시할 수 있다.
- 5.2 광원의 중심 파장 및 대역폭은 광스펙트럼 분석기(OSA)를 이용해 안정성을 사전에 확인한다.
- 5.3 해상도 측정을 위한 평면거울 및 점 산란체 샘플은 깨끗한 상태로 준비되어야 한다.
- 5.4 민감도 측정을 위한 평면거울 및 광 가변 감쇠기(VOA)를 설치한다.
- 5.5 외부 진동, 온도 변화 등의 측정에 영향을 미칠 수 있는 환경 요인은 가능한 한 최소화한다.
- 5.6 모든 측정에서 획득한 Raw data는 분석 결과와 함께 전자적 형태로 보관한다.
- 보관 형태: Raw interferogram 및 A/B-scan 데이터는 무손실 형식(csv, dat, tiff 등)으로 저장하며, 측정 조건(날짜, 장비 설정, 운영자 등) 메타데이터를 함께 기록한다.
 - 보관 기간 및 방법: 최소 3년간 무결성이 보장된 상태로 보관하며, 규정된 기간 이후에는 관련 법규 및 기관 규정에 따라 처리한다. 주기적으로 백업하여 데이터 유실을 방지한다.

6. 소요장비 명세

- 6.1 OCT 장비: 시험 측정 대상 장비로 기준암 말단의 기준 거울로부터의 반사되는 빛의 양을 조절할 수 있도록 VOA나 ND 필터가 설치될 수 있는 조건을 갖춰야 하며, 기준암과 샘플 암의 광 경로 차이 조절이 가능한 조건을 갖춰야 한다. 또한, A-scan, B-scan 이미지 및 프로파일 데이터를 디스플레이하고, 추출할 수 있는 조건을 갖추고 있어야 한다.
- 6.2 광스펙트럼 분석기 (Optical Spectrum Analyzer, OSA): OCT 시스템의 해상도를 측정하는데 필요한 장비로 측정 시험하고자 하는 OCT 시스템의 광원 파장 대역에서 측정이 가능하며, 최소 분해능이 0.1 nm보다 고분해능이거나 같아야 하며, 측정 데이터를 통신이나 외부 장치로 추출할 수 있어야 한다.



그림 4 광 스펙트럼 분석기 예시

KRISs	연구장비 성능평가 절차서	절차서 등록번호	PE-OCT-001-2025
	공간섭단층영상 장비의	제·개정번호	01
	해상도 및 민감도 성능평가 절차서	제정일	2025.08.13
		최종 개정·확인일	2025.08.13

6.3 빔 프로파일러 (Beam Profiler): 횡방향 해상도 측정 시 빔의 개구수(NA)를 산출하기 위해 빔의 광 세기 정보를 측정하는 장비로 빔의 광 세기의 2차원적 정보를 획득하고 추출할 수 있어야 하며, 입사 광 파워 세기를 조절하기 위해 ND 필터 장착이 가능한 형태여야 한다. 또한, 빔의 형태를 모니터링할 수 있는 디스플레이 소프트웨어가 함께 제공되어야 한다.

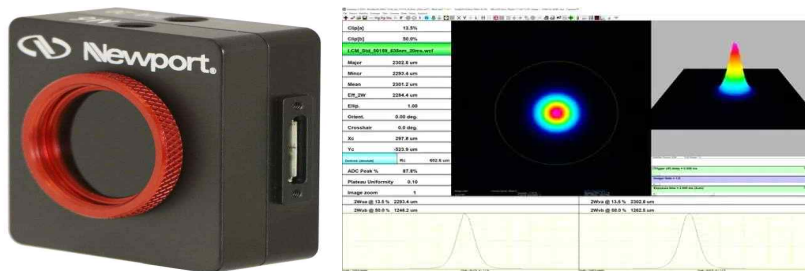


그림 5 빔 프로파일러와 빔 프로파일 분석 소프트웨어 예시

6.4 해상도 타겟: OCT의 횡방향 해상도 측정을 위한 표준화된 샘플. 금속 패턴 배열로 구성되어 있어서 금속 패턴과 패턴 아닌 부분이 명확해서 패턴 경계 부분의 퍼짐 정도를 평가할 수 있음. 이때 시편의 금속과 비금속 영역 간 반사율 대비는 10 dB 이상, 금속층 두께는 100 nm 이상으로 하여 충분한 반사 대비를 확보한다. edge sharpness는 OCT의 예상 횡방향 해상도 FWHM의 1/5 이하를 권장한다. 표면 평탄도는 상용 해상도 타겟 기준($\leq 15 \mu\text{m}$)으로 허용하되, 측정 ROI 내 국소 평탄도(표면 높이 표준편차)는 축방향 해상도의 30% 이하를 권장한다.



그림 6 해상도 타겟의 예시: USAF 1951, Square test target, grid target

6.5 평면거울(Flat mirror): 축방향 해상도 측정용, 민감도 측정용 기준 반사 샘플로 사용한다. 시험하는 OCT 광원 대역에서 반사율이 일정하게 유지되어야 하며, 입사되는 빔의 크기보다 큰 사이즈를 가져야 한다. 또한, 외부 환경에 잘 견디는 내식성, 내환경성의 특성을 가져야 한다.

KRISs	연구장비 성능평가 절차서	절차서 등록번호	PE-OCT-001-2025
		제·개정번호	01
	공간섭단층영상 장비의 해상도 및 민감도 성능평가 절차서	제정일	2025.08.13
		최종 개정·확인일	2025.08.13

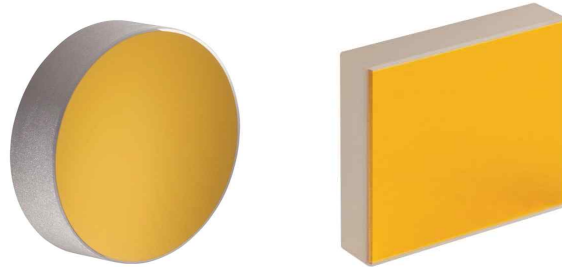


그림 7 내식성, 내환경성 특성 금 소재 평면거울 예시

6.6 다층 구조 샘플: OCT 축방향 단층 이미지 특성을 참고용으로 제시하기 위해 사용되는 샘플이다. 다층 구조 샘플은 최소 3층 구조를 갖도록 하며, 투명 재료를 이용하여, glass-air-glass 혹은 폴리머 필름 적층 구조 등으로 제작한다. 성능 평가하는 장비의 광원 파장 대역에서 다층 구조 샘플 전체 투과율이 80~90 % 이상이 되는 것을 권장하며, 평탄도는 약 15 μm 를 권장한다.

6.7 ND 필터와 VOA: OCT 시스템의 reference arm 또는 sample arm 광 세기를 제어하여 적절한 SNR을 확보하고, detector의 동작 범위에 맞추어 노이즈를 최소화하기 위해 광 감쇠기 (optical attenuator)가 필요하다.



그림 8 ND 필터와 VOA 예시

6.8 연산 소프트웨어: 측정된 A-scan 또는 B-scan 영상 데이터를 분석하여 해상도, 민감도, SNR 등을 계산하기 위해 연산 소프트웨어가 필요하다. 이 소프트웨어는 다음과 같은 기능을 수행할 수 있어야 한다:

- 영상 또는 신호 프로파일의 평균값, 표준편차, 최대값 등을 계산하는 기능
- Gaussian 함수 등으로 fitting을 수행하고 FWHM을 도출하는 기능
- 데이터 처리 및 통계 분석을 위한 수식 계산 및 그래프 작성 기능

6.9 정밀 이동 스테이지: 시험 진행 시, 빔 프로파일러 및 기준거울을 광축 정렬된 상태에서

KRISs	연구장비 성능평가 절차서	절차서 등록번호	PE-OCT-001-2025
	공간섭단층영상 장비의	제·개정번호	01
	해상도 및 민감도 성능평가 절차서	제정일	2025.08.13
		최종 개정·확인일	2025.08.13

이동하기 위한 장치로 z 방향으로 선형 이동할 수 있는 최소 해상도 10 μm 이하의 성능을 갖는 스테이지를 사용한다.

6.10 광 파워 미터: 민감도 측정 시 기준암 파워를 조절하거나 광 정렬하는 경우에 광 파워 미터 측정이 필요하다. 광 파워 미터의 허용 파워 범위는 시험 장비의 광 파워를 초과하지 않아야 하며, 광섬유 타입과 자유공간 측정 타입의 광 센서를 모두 갖추고 있어서 다양한 조건에서 측정의 어려움이 없어야 한다.



그림 9 광 파워미터 예시

7. 시험방법

(참고: 본 절차서에서 특별한 사유가 없는 한 측정 반복 횟수는 11회 이상으로 규정한다. 이는 A형 불확도를 산출하기 위해 충분한 표본을 확보하기 위한 최소한의 횟수이며, 장비의 조건 및 측정 시간 제약을 고려하여 반복 횟수를 그 이하로 설정한 경우는 유효 자유도 저하 및 불확도 증가 영향을 감수하는 것으로 성능 평가서에 기재해야 한다.)

7.1 축방향 해상도 측정

7.1.1 이론적 축방향 해상도 산출

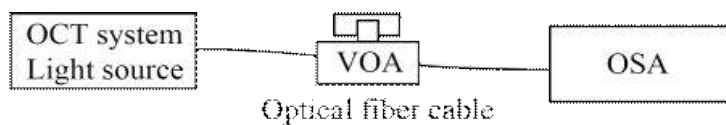


그림 10 OCT 광원 광 스펙트럼 측정 광학적 모식도 예시

KRISs	연구장비 성능평가 절차서	절차서 등록번호	PE-OCT-001-2025
		제·개정번호	01
	공간섭단층영상 장비의 해상도 및 민감도 성능평가 절차서	제정일	2025.08.13
		최종 개정·확인일	2025.08.13

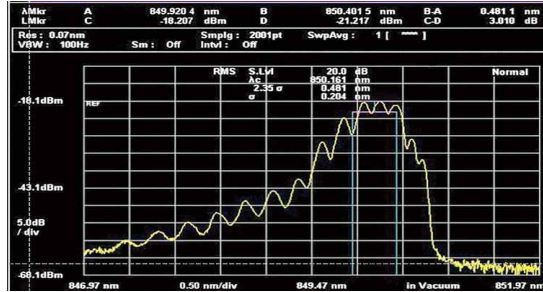


그림 11 OSA를 이용한 광원 측정 결과 예시

7.1.1.1 OCT 광원의 출력이 OSA의 최대 수용 입력 파워를 초과하지 않는지 확인하고, 초과하는 경우 VOA와 같은 광 감쇠기 등을 사용하여 광 파워를 적절히 낮춰 포화 현상이 발생하지 않도록 한다. 광원 출력 포트는 OSA 입력 포트에 광섬유 케이블을 통해 연결하며, 측정 중 외부 진동이나 움직임으로 인한 간섭을 방지하기 위해 케이블은 테이프 등으로 고정하여 안정적으로 유지한다.

7.1.1.2 중심 파장 및 파장 대역폭을 고려하여 전체 파장 범위를 설정하고, 중심 파장이 측정 범위의 중앙에 위치하도록 한다. 스펙트럼 측정을 위한 OSA의 분해능(RBW)은 최소 0.1 nm 이하로 설정하되, 광원의 대역폭이 좁은 경우에는 0.05 nm 이하로 조정한다. 광원 출력 변동률이 $\pm 1\%$ 이하, 중심 파장 광원의 상대 표준편차가 0.5 % 이하일 경우 Sweep average 횟수를 5회로 설정하고, 이 기준에 미치지 못하는 출력 변동이 있는 광원일 경우 10회 이상으로 설정하여 측정값의 안정성을 확보할 수 있다.

7.1.1.3 OSA의 sweep 기능을 반복 작동시켜 실제 측정된 파장 대역폭을 확인하고, 중심 파장이 스펙트럼 범위의 중앙에 위치하도록 전체 sweep 범위를 조정한다. 반복 측정 평균의 통계적 신뢰성 제고를 통한 표준 불확도 감소를 위해 동일 sweep 조건에서 최소 11회 이상 반복 측정을 수행하며, 각 sweep 간 간격을 일정하게 유지하여 장비 발열이나 노이즈 영향을 최소화한다. 획득한 스펙트럼 데이터는 .csv 또는 .txt와 같은 텍스트 형식으로 저장하며, 파일 저장 시 구분자(delimiter)는 쉼표(,) 또는 탭(tab) 형식으로 지정한다. 데이터는 OSA 장비의 통신 포트(예: USB, GPIB, Ethernet 등)를 통해 외부 PC로 전송하거나, USB 저장 장치 등을 통해 직접 추출할 수 있다.

7.1.1.4 광원의 스펙트럼이 가우시안 형태인 경우와 비가우시안 형태인 경우로 나뉘어서 다음과 같이 측방향 해상도를 산출한다. 광원 스펙트럼이 가우시안 형태인 경우, 식 (2)를 통해 중심 파장을 산출하고 식 (3)을 통해 대역폭을 산출하여 식 (1)에 대입하여 측방향 해상도를 계산한

KRISs	연구장비 성능평가 절차서	절차서 등록번호	PE-OCT-001-2025
	공간섭단층영상 장비의	제·개정번호	01
	해상도 및 민감도 성능평가 절차서	제정일	2025.08.13
		최종 개정·확인일	2025.08.13

다. 일부 OSA는 자동 중심 파장 계산 기능과 자동 대역폭 측정 기능을 제공한다. 광원 스펙트럼이 비가우시안 형태인 경우에는 식 (4)를 통해 산출한다.

7.1.2 실제 측방향 해상도 측정

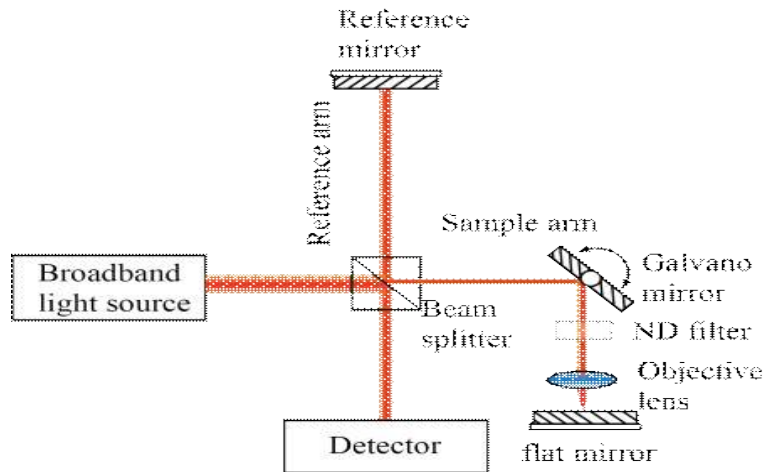


그림 12 실제 측방향 해상도 측정을 위한 광학적 모식도 예시

7.1.2.1 실제 측방향 해상도를 평가하기 위해서 OCT의 샘플암에 고반사율 평면거울을 설치하고 광축 정렬을 수행한다. 이때 횡방향(x,y) 위치는 시스템의 스캐닝 빔 중심과 일치하도록 조정하며, 깊이(z) 위치는 기준암과 광경로차가 0이 되는 지점에서 최대 간섭 신호가 유지되는 위치로 정렬한다. 거울의 반사율이 높아 센서의 동적 범위를 초과하는 신호 입력으로 광 포화(saturation)를 유발할 수 있으므로 VOA(Variable Optical Attenuator) 또는 ND(neutral density) 필터를 이용하여 샘플암 출력을 적절히 감쇠하여 조절한다.

7.1.2.2 기준암의 출력 역시 VOA 또는 ND 필터를 통해 감쇠하여 간섭 신호가 센서의 동적 범위 내에 형성되도록 한다. 기준암과 샘플암의 광 경로 차이는 A-scan 내에서 거울 반사 신호가 적절한 깊이에 위치하도록 조절한다.

7.1.2.3 A-scan 신호 획득 시 노이즈 억제를 위해 동일 조건으로 A-scan 신호를 최소 11회 반복 획득하고 평균화를 수행한다.

KRISs	연구장비 성능평가 절차서	절차서 등록번호	PE-OCT-001-2025
	공간섭단층영상 장비의	제·개정번호	01
	해상도 및 민감도 성능평가 절차서	제정일	2025.08.13
		최종 개정·확인일	2025.08.13

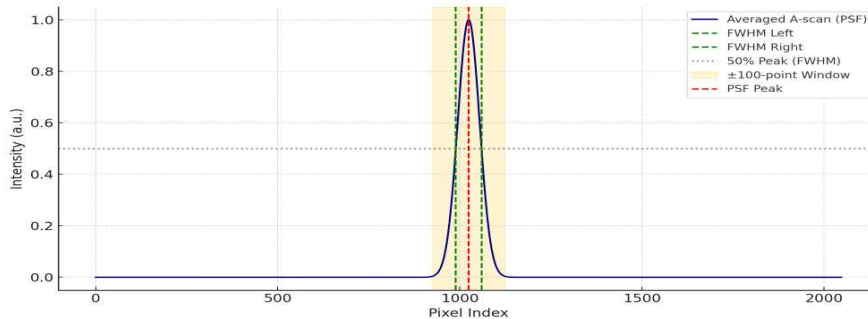


그림 13 평균화된 거울 반사 OCT A-scan 신호 PSF 측정 예시

7.1.2.4 평균 A-scan 신호 내에서 최대 피크를 중심으로 최대 피크의 5 % 이하 신호 세기가 되는 범위까지 윈도우를 설정하여 해당 범위 내에서 PSF의 FWHM을 계산한다. PSF가 대칭적이며 단일 피크 형태를 보이는 경우에는 가우시안 함수로 피팅하여 FWHM을 계산할 수 있으며, 이 경우 해상도 계산의 정확도를 향상시킬 수 있다. 단, 광원 스펙트럼의 특성 또는 시스템의 영향으로 PSF가 비대칭이거나 멀티 피크 특성을 보일 경우, 가우시안 피팅은 부적절할 수 있으며, 직접 FWHM 측정 또는 다른 함수 모델을 고려해야 한다. 측정된 FWHM을 픽셀 단위에서 시스템의 깊이 스케일($\mu\text{m}/\text{pixel}$)을 곱하여 해상도로 환산한다.

7.1.2.5 시스템의 이미징 깊이(Imaging Depth) 성능이 제공되는 경우 A-scan을 이루는 픽셀 개수로 이미징 깊이를 나눠 깊이 스케일을 계산할 수 있다. 시스템의 이미징 깊이 확인이 어렵다면, 샘플암에 z축 평형 이동 스테이지에 고정된 평면거울을 장착하고 기준 위치에서 A-scan을 획득하고, 평형 이동 스테이지를 z축 방향으로 일정 거리(예: $100\mu\text{m}$)를 이동시켜 A-scan을 다시 획득한다. 각 A-scan에서 피크 위치를 측정하여 두 피크 간의 픽셀 차이(Δpixel)를 계산하여 깊이 스케일을 계산할 수 있다.

7.1.2.6 또한, OCT의 깊이 방향 단층 구조 이미징 특성을 반영하기 위해 다층 구조의 샘플을 이미징하여 획득한 단층 이미지를 성능 평가서에 축방향 해상도와 함께 참고용으로 제시한다. 샘플에 의한 반사 정도를 고려하여 VOA나 ND 필터를 이용하여 적절히 감쇠하여 이미징한다. 다층 구조 샘플 측정 시, 시스템의 빔 방향과 샘플의 층 구조가 최대한 수직하게 정렬하도록 하나 다중 반사(에탈론) 발생을 억제하기 위하여 샘플을 빔 축에 대해 미세하게 기울여 이미징할 수 있다. 기울임 각도는 일반적으로 0.5° 이하를 권장하며, 각도 허용 범위는 샘플 구조 및 광학계 조건에 따라 조정될 수 있다.

KRISs	연구장비 성능평가 절차서	절차서 등록번호	PE-OCT-001-2025
	공간섭단층영상 장비의	제·개정번호	01
	해상도 및 민감도 성능평가 절차서	제정일	2025.08.13
		최종 개정·확인일	2025.08.13

7.2 횡방향 해상도 측정

7.2.1 이론적 횡방향 해상도 산출

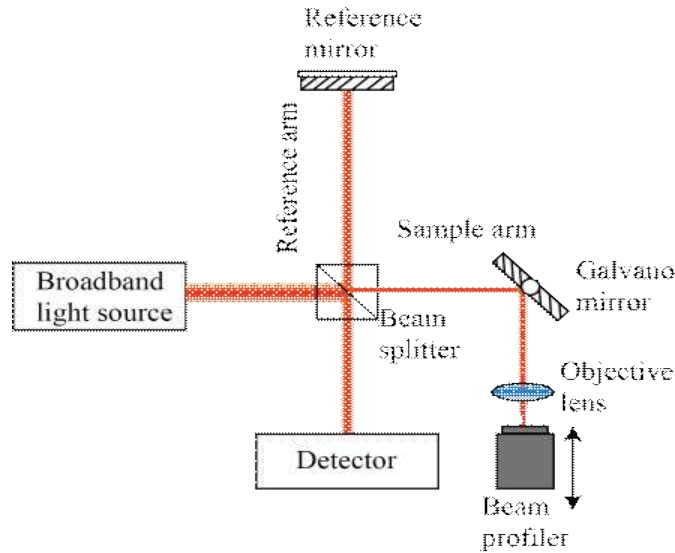


그림 14 빔 프로파일러를 이용한 NA 측정 모식도 예시

7.2.1.1 OCT 광원의 이론적 횡방향 해상도 산출을 위해, 렌즈의 NA를 측정한다. 이를 위해 z 축 평행 이동 스테이지에 빔 프로파일러를 장착하고, 샘플암에서 나오는 빔과 빔 프로파일러의 광축을 정렬되도록 설정한다. 이때 빔 프로파일러는 샘플 출력면과 직교하도록 배치하여 빔 프로파일러가 왜곡 없이 측정되도록 하며, 빔의 강도 분포가 축대칭 형태를 유지하도록 조정한다. 빔 강도가 높아 센서 포화(saturation)가 발생할 우려가 있는 경우, 빔 프로파일러에 ND 필터를 장착하여 입사 광 파워를 조절한다.

7.2.1.2 빔 프로파일러를 초점 부근으로부터 z축 방향으로 이동시키며, 일정 간격마다 빔 intensity profile을 획득한다. 측정 지점은 최소 6개 이상 확보하되, 초점 위치를 중심으로 레일리 범위를 포함하여 이를 초과하는 거리까지 측정 지점을 고르게 분포시켜야 한다. 이는 빔 반경의 z축 방향 변화가 비선형적으로 나타나는 구간을 충분히 반영하여, 보다 정밀한 곡선 피팅 및 NA 계산을 가능하게 한다.

7.2.1.3 가우시안 빔인 경우, z 축 방향으로 각 측정 지점에서 얻은 intensity profile로부터 $1/e^2$ 기준의 빔 반경을 산출하고, 각 측정 지점에서의 빔 반경값을 해당 데이터에 대해 다음의 가우시안 빔 모델 식(10)을 비선형 피팅을 적용하여 초점에서의 반각(θ)을 산출한다.

KRISs	연구장비 성능평가 절차서	절차서 등록번호	PE-OCT-001-2025
	공간섭단층영상 장비의	제·개정번호	01
	해상도 및 민감도 성능평가 절차서	제정일	2025.08.13
		최종 개정·확인일	2025.08.13

$$w(z) = w_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{z_R}\right)^2} \quad (10)$$

(w_0 : beam waist, z_R : 레일리 범위)

산출된 빔 웨이스트를 식 (7)에 대입하여 NA를 계산한다.

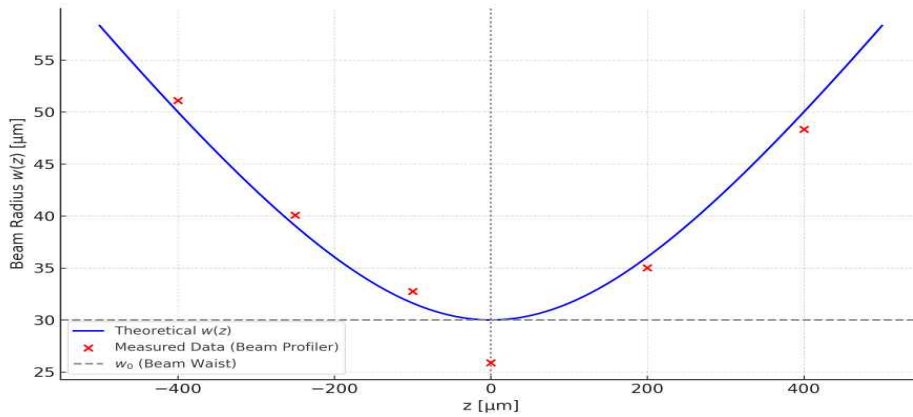


그림 15 빔 프로파일러 측정 데이터의 가우시안 빔 피팅 적용 예시

7.2.1.4 비가우시안 빔인 경우, 각 측정 지점에서의 2차원 intensity profile 배열을 추출하여 RMS 반경을 식(11)을 이용하여 도출한다.

$$w_{rms} = \sqrt{\frac{\iint (x^2 + y^2) I(x, y) dx dy}{\iint I(x, y) dx dy}} \quad (11)$$

($I(x, y)$: 위치 (x, y) 에서의 intensity)

각 지점에서 산출된 RMS 반경에 대해 $w(z) = \theta z + b$ 의 1차 모델에 대해 선형 회귀(linear regression)를 적용하여 θ 를 구하고, 이 값을 식 (7)에 대입하여 NA를 계산한다.

(참고: 가우시안 빔에서의 빔 웨이스트와 RSM 반경은 $w_{RMS} = w_0/2$ 의 관계가 성립한다. 또한, 가우시안 빔의 FWHM은 $w_{FWHM} = \sqrt{2 \ln 2} w_0 \approx 1.177 w_0$ 이므로, $w_{RMS} \approx 0.425 w_{FWHM}$ 이다.)

7.2.1.5 조건에 맞게 계산된 NA와 OSA 스펙트럼 데이터와 식 (2)로부터 산출된 중심 파장을 이용하여 식 (5)에 대입하여 이론적 횡방향 해상도를 계산한다.

KRISs	연구장비 성능평가 절차서	절차서 등록번호	PE-OCT-001-2025
	공간섭단층영상 장비의	제·개정번호	01
	해상도 및 민감도 성능평가 절차서	제정일	2025.08.13
		최종 개정·확인일	2025.08.13

7.2.2 실제 횡방향 해상도 측정

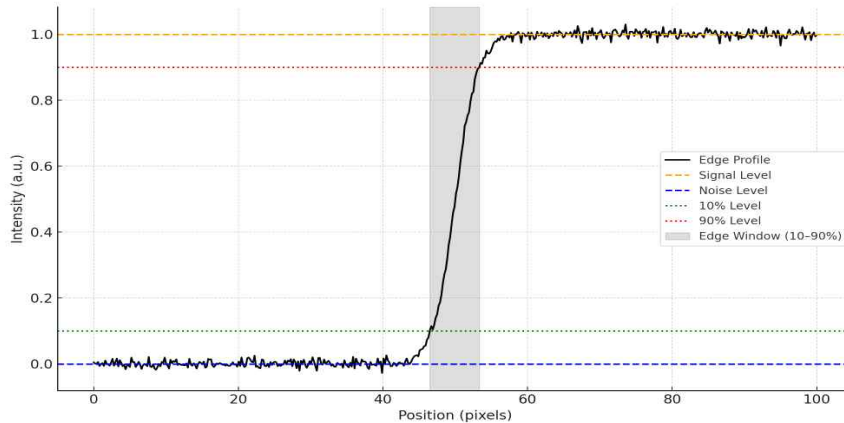


그림 16 정규화된 금속 엣지 intensity profile 전이 구간 분석 예시

7.2.2.1 금속 엣지가 포함된 해상도 타겟을 OCT 시스템의 횡방향(B-scan)과 평행하도록 고정하고, 금속 영역과 비금속 영역을 동시에 포함하도록 빔의 위치를 조절한다. 엣지 라인이 가로 방향(x축)을 따라 뚜렷하게 획득될 수 있도록 타겟 표면은 초점면과 일치하도록 조절한다. 엣지가 이미지 내에서 수직(z축 방향)으로 형성되도록 세팅하며, 스캔 파라미터(A-scan 수, B-scan 수, 스캔 범위 등)를 고정된 상태로 설정한다.

7.2.2.2 11회 이상 반복하여 획득된 OCT B-scan 이미지에서 가장 명확한 엣지를 선택하고, 해당 엣지를 가로(x축) 방향으로 가로지르는 intensity profile을 추출한다. 일반적으로는 엣지가 위치한 고정된 z(깊이) 위치에서 intensity를 x축 방향으로 추출하며, 신호의 노이즈를 줄이기 위해 인접 z축 범위(예: ±2 pixel) 내에서 평균 intensity profile을 산출하는 것이 바람직하다.

7.2.2.3 평균 intensity profile로부터 전이 구간의 좌우에서 intensity가 변하지 않는 부분에서 최소 10 pixel 이상을 영역으로 선정하고 이 영역을 평균한 값을 노이즈 기준 레벨(I_{NOISE})과 신호 기준 레벨(I_{SIGNAL})로 정한다.

7.2.2.4 평균 intensity profile을 이 두 기준값을 이용해 0~1 범위로 다음 식(12)와 같이 정규화한다.

$$I_{NORMAL} = \frac{I(x) - I_{NOISE}}{I_{SIGNAL} - I_{NOISE}} \quad (13)$$

KRISS	연구장비 성능평가 절차서	절차서 등록번호	PE-OCT-001-2025
	공간섭단층영상 장비의	제·개정번호	01
	해상도 및 민감도 성능평가 절차서	제정일	2025.08.13
		최종 개정·확인일	2025.08.13

7.2.2.5 정규화된 평균 intensity profile로부터 intensity가 0.1에서 0.9로 증가하는 구간에서의 x 좌표의 차이를 전이 거리(Δx_{10-90})로 정의한다. 이때 전이 시작점과 종료점은 각각 $I=0.1$ 및 $I=0.9$ 가 되는 x축 좌표에서 선형 보간으로 계산한다.

7.2.2.6 횡방향 해상도는 통상 PSF 의 FWHM으로 정의되며, PSF가 가우시안 형태를 따를 경우 edge spread function(ESF)은 오류 함수(erf) 형태가 된다. 이때 ESF의 10-90 % 전이폭 (Δx_{10-90})과 PSF의 FWHM은 다음과 같은 관계를 가진다.

$$FWHM \approx 0.919 \times \Delta x_{10-90} \quad (14)$$

이를 통해 다음 식(14)와 같이 횡방향 해상도를 계산할 수 있다.

$$\Delta x = \frac{\Delta x_{10-90}}{0.919} \quad (15)$$

산출된 FWHM은 기본적으로 픽셀 단위로 나타나므로, OCT 시스템의 횡방향 스캔 범위(예: 3 mm)와 A-scan 수(예: 1024)를 이용하여 픽셀당 거리 단위를 계산한다. 상기 과정을 최소 11회 이상 반복 측정을 수행하고, 평균값과 표준편차를 산출하도록 한다.

(참고: ESF의 10-90% 전이 구간을 상수로 환산하는 방법은 가우시안 PSF를 가정하여 유도된 것이다. 따라서 빔 프로파일이 비가우시안인 경우에는 해당 상수 적용이 타당하지 않으며, 이 경우에는 ESF를 미분하여 얻은 LSF의 FWHM을 직접 측정하는 방식을 권장한다.)

7.2.2.7 회전형 OCT 시스템에서 금속 엣지를 이용한 횡방향 해상도 측정은 엣지가 중심축을 기준으로 수직(즉, 반지름 방향)을 향하도록 배치되어야 한다. 이 경우 엣지와 중심축 사이의 거리 R과 A-scan 개수 N을 바탕으로 픽셀당 호의 길이($\mu\text{m}/\text{pixel}$)를 다음과 같이 계산할 수 있으며, θ 방향 intensity profile을 이용해 해상도를 분석한다.

7.3 OCT 민감도 측정

7.3.1 단일 반사면을 갖는 평면 반사체를 샘플암에 장착할 수 있도록 준비하고, 반사체의 위치를 깊이 방향(z축)으로 정밀하게 조절할 수 있도록 선형 이동 z축 스테이지를 확보한다. 이 장치는 기준 깊이 및 다양한 깊이에서의 SNR 및 Roll-off 측정을 가능하게 한다.

7.3.2 평면 반사체를 수평 이동 z축 스테이지에 고정하여 샘플암에 장착한 후, OCT 시스템과 광 정렬을 수행한다. 광 정렬은 interference fringe의 명확도를 기준으로 수행하며, 기준암과 샘플암의 광경로 차이가 0이 되도록 정렬한다. 기준암 내에 VOA를 설치하여 기준암 파워를 세밀하게 조절할 수 있도록 한다.

KRISs	연구장비 성능평가 절차서	절차서 등록번호	PE-OCT-001-2025
	공간섭단층영상 장비의	제·개정번호	01
	해상도 및 민감도 성능평가 절차서	제정일	2025.08.13
		최종 개정·확인일	2025.08.13

7.3.3 기준암 파워는 시스템의 감지기 포화 및 노이즈 수준을 고려하여 전체 출력 범위의 하한(예: 약 10%)부터 상한(예: 포화 직전)까지 0.5~1 dB 간격으로 조절하도록 한다. 각 조건에서 A-scan을 11회 이상 반복 측정하여 평균 A-scan을 산출하고, 반사체에 대응하는 깊이 위치에서의 신호 피크(S)를 추출한다. 신호 피크 위치의 앞뒤 약 ± 100 pixel 구간에서 배경 잡음의 표준편차(σ)를 산출하고, 식 (10)으로 SNR을 계산한다. 가장 높은 SNR을 보이는 기준암 파워를 선정하고, 이후의 모든 측정에서는 이 기준암 파워 조건을 고정하여 사용한다.

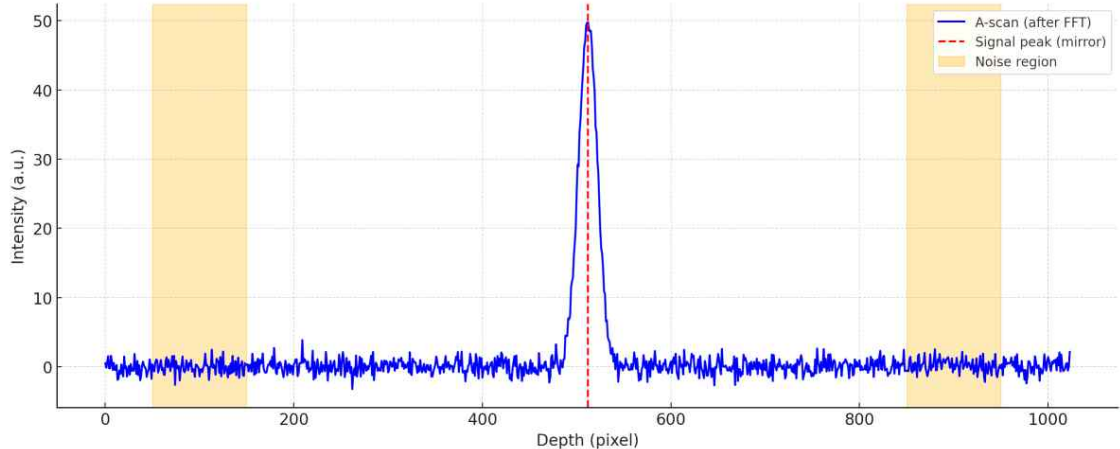


그림 17 최적 기준암 파워 선정시에 OCT A-scan 프로파일의 신호와 노이즈 측정 예시

7.3.4 기준암과 샘플암의 광경로 차이가 0인 상태를 유지한 채, 기준 깊이($z = 0$ mm)에서 A-scan을 11회 이상 반복 측정하고 평균화하여 신호 피크(S)를 구한다. 이어 샘플암의 광을 완전히 차단한 상태(예: 차광 커버 또는 빔 블로커 활용)에서 A-scan을 동일 횟수로 반복 측정하고 평균화한 데이터를 통해 표준편차(σ)를 산출한다. SNR은 앞서 정의한 식을 사용하여 계산하며, 이 과정을 11회 이상 반복하여 평균 SNR과 표준편차를 산출하고 이를 시스템의 민감도로 기록한다.

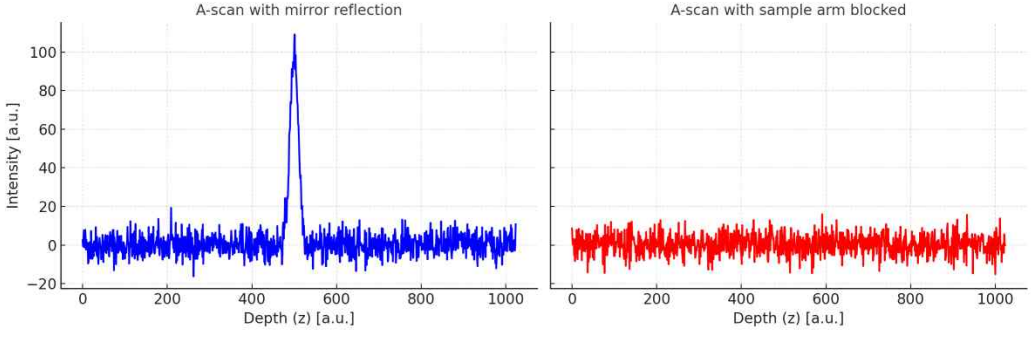


그림 18 SNR의 신호를 측정한 A-scan(좌)과 노이즈를 측정한 A-scan(우)의 예시

KRISS	연구장비 성능평가 절차서	절차서 등록번호	PE-OCT-001-2025
	공간섭단층영상 장비의	제·개정번호	01
	해상도 및 민감도 성능평가 절차서	제정일	2025.08.13
		최종 개정·확인일	2025.08.13

7.3.5 복소 가우시안 노이즈의 크기를 사용하여 SNR을 계산할 경우, 해당 노이즈는 레일리 분포를 따르게 되어 SNR이 이론적으로 약 6.68 dB 과대 평가될 수 있다. 필요시 레일리 분포 기반의 통계 보정값을 적용할 수 있으며, 보정 여부는 결과 보고서에 명시한다.

7.3.6 샘플암의 반사체를 z축 스테이지로 0부터 시스템의 유효 감지 한계(예: SNR이 -6 dB 이하로 떨어지기 전 깊이)까지 일정 간격(예: 0.5 mm)으로 이동시키며 각 지점에서 A-scan을 획득하며, 각 깊이에서의 7.3.4의 과정을 반복한다. 이때, 기준암 파워, 디텍터 세팅 등 민감도 측정 시와 동일한 조건으로 유지하여 노이즈 수준을 일정하게 하도록 한다. 이때 최대 SNR 대비 -6 dB에 해당하는 깊이를 유효 감지 깊이로 정의하고 참고사항으로 함께 기입한다.

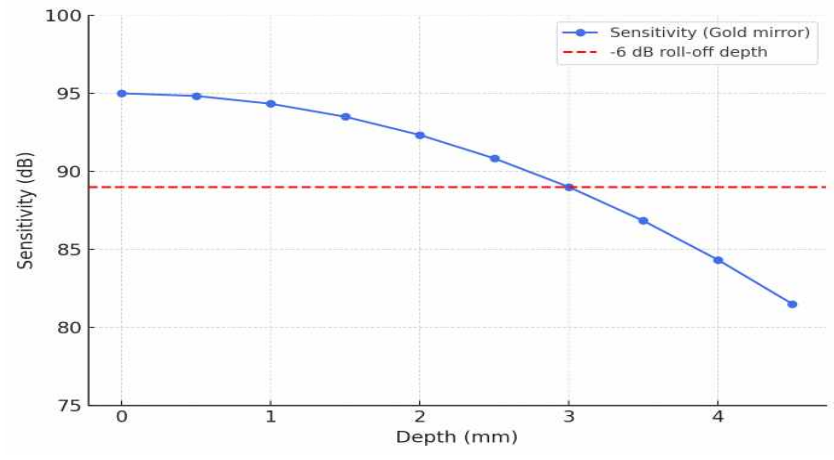


그림 19 측정된 Roll-off 그래프와 유효 감지 깊이 측정 데이터 예시

8. 평가 불확도 산정

측정 불확도는 ‘한국표준과학연구원 측정불확도 표현 지침 (KRISS/SP-2010-105)’ 에 따라 산정하며, 축방향 해상도, 횡방향 해상도, 민감도에 대한 측정 불확도 요인을 계산한다.

8.1 광 스펙트럼 기반 이론 축방향 해상도 불확도 분석

(1) 불확도 요인 정의

1-1) 중심 파장의 불확도(u_{λ_0}) 계

불확도 성분	기호	설명	불확도 값	확률 분포 형태	자유도 ν_i
파장 정확도	$u_{\lambda_0,1}$	기기 사양에 따른 파장 정확도 ± 0.03 nm	$\frac{0.03}{\sqrt{3}}$ ≈ 0.0173 nm	사각	50 (상대 불확도 기반 자유도)

KRISs	연구장비 성능평가 절차서	절차서 등록번호	PE-OCT-001-2025
	공간섭단층영상 장비의	제·개정번호	01
	해상도 및 민감도 성능평가 절차서	제정일	2025.08.13
		최종 개정·확인일	2025.08.13

과장 안정도	$u_{\lambda_0,2}$	기기 사양에 따른 과장 안정도 ± 0.005 nm	$\frac{0.005}{\sqrt{3}}$ ≈ 0.00289 nm	사각	50 (상대 불확도 기반 자유도)
도심 추정 오차	$u_{\lambda_0,3}$	문헌 및 실험 기반 추정 ± 1 nm	$\frac{1.0}{\sqrt{3}}$ ≈ 0.5774 nm	사각	10 (상대 불확도 기반 자유도)
반복 측정	$u_{\lambda_0,4}$	11회 측정 시 표준 불확도 (평균:1312.60 nm 표준편차: 0.12 nm)	$\frac{0.12}{\sqrt{11}}$ ≈ 0.0361 nm	t 분포	10

중심 파장의 불확도:

$$u_{\lambda_0} = \sqrt{u_{\lambda_0,1}^2 + u_{\lambda_0,2}^2 + u_{\lambda_0,3}^2 + u_{\lambda_0,4}^2} = 0.5788 \text{ nm}$$

중심 파장의 자유도:

$$\nu_{\lambda_0} = \frac{u_c^4}{\sum \left(\frac{u_i^4}{\nu_i} \right)} \approx 10.10$$

1-2) 대역폭 불확도($u_{\Delta\lambda}$) 계산

불확도 성분	기호	설명	불확도 값	확률 분포 형태	자유도 ν_i
과장 정확도	$u_{\Delta\lambda,1}$	기기 사양에 따른 과장 정확도 ± 0.03 nm	$\frac{0.03}{\sqrt{3}}$ ≈ 0.0173 nm	사각	50 (상대 불확도 기반 자유도)
해상도 밴드폭	$u_{\Delta\lambda,2}$	기기 설정: 0.2 nm	$\frac{0.1}{\sqrt{3}}$ ≈ 0.0577 nm	사각	50 (상대 불확도 기반 자유도)
스펙트럼 추정 오차	$u_{\Delta\lambda,3}$	문헌 및 실험 기반 추정 ± 2.0 nm	$\frac{2}{\sqrt{3}}$ ≈ 1.1547 nm	사각	10 (상대 불확도 기반 자유도)
반복 측정	$u_{\Delta\lambda,4}$	11회 측정 시 표준 불확도 (평균:97.3 nm 표준편차: 0.239 nm)	$\frac{0.239}{\sqrt{11}}$ ≈ 0.0720 nm	t 분포	10

KRISs	연구장비 성능평가 절차서	절차서 등록번호	PE-OCT-001-2025
	공간섭단층영상 장비의	제·개정번호	01
	해상도 및 민감도 성능평가 절차서	제정일	2025.08.13
		최종 개정·확인일	2025.08.13

대역폭의 불확도:

$$u_{\Delta\lambda} = \sqrt{u_{\Delta\lambda,1}^2 + u_{\Delta\lambda,2}^2 + u_{\Delta\lambda,3}^2 + u_{\Delta\lambda,4}^2} = 1.1565 \text{ nm}$$

대역폭의 자유도:

$$\nu_{\Delta\lambda} = \frac{u_c^4}{\sum \left(\frac{u_i^4}{\nu_i} \right)} \approx 10.06$$

2) 입력값 및 감도계수

$$\lambda_0 = 1312.6 \text{ nm}$$

$$\Delta\lambda = 97.3 \text{ nm}$$

$$u_{\lambda_0} = 0.5788 \text{ nm}$$

$$u_{\Delta\lambda} = 1.1565 \text{ nm}$$

$$c_1 = \frac{4 \ln 2}{\pi} \frac{\lambda_0}{\Delta\lambda} \approx 0.012$$

$$c_2 = -\frac{2 \ln 2}{\pi} \frac{\lambda_0^2}{\Delta\lambda^2} \approx -0.080$$

3) 기여량 및 합성표준불확도

기여량:

$$(|c_1| \times u_{\lambda_0})^2 = (0.012 \times 0.5788)^2 = 4.8241 \times 10^{-5} \mu\text{m}^2$$

$$(|c_2| \times u_{\Delta\lambda})^2 = (0.080 \times 1.1565)^2 = 8.5599 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$$

합성표준불확도:

$$u_c = \sqrt{(|c_1| u_{\lambda_0})^2 + (|c_2| u_{\Delta\lambda})^2} = 0.0928 \mu\text{m}$$

4) 유효 자유도 및 확장불확도

$$\nu_{eff} = \frac{u_c^4}{\sum \left(\frac{u_i^4}{\nu_i} \right)} \approx 10.17$$

$$U = k \times u_c = 2.22 \times 0.0928 \approx 0.21 \mu\text{m}$$

5) 최종 결과 보고

광 스펙트럼 분석 기반 이론 축방향 해상도:

$$\Delta z = (7.81 \pm 0.21) \mu\text{m} \quad (\text{신뢰의 수준 약 95\%, 포함 인자 } k = 2.22)$$

KRISs	연구장비 성능평가 절차서	절차서 등록번호	PE-OCT-001-2025
	공간섭단층영상 장비의	제·개정번호	01
	해상도 및 민감도 성능평가 절차서	제정일	2025.08.13
		최종 개정·확인일	2025.08.13

6) 불확도 총괄표

성분	표준불확도 $u(x_i)$	확률 분포형태	감도계수 $ c_i $	기여량 $ c_i u(x_i)$	자유도 ν_i
중심파장 λ_0	0.5797 nm	-	0.012	0.0069456 μm	10.10
대역폭 $\Delta\lambda$	1.1574 nm	-	0.080	0.09252 μm	10.06
합성표준불확도				0.0928 μm	10.17
확장불확도 ($k=2.22$)				0.21 μm	

8.2 거울 신호 측정 기반 측방향 해상도 불확도 분석

1) 불확도 요인 정의

불확도 성분	기호	설명	불확도 값	확률 분포 형태	자유도 ν_i
측방향 스케일 오차	$u_{\Delta z,1}$	스테이지 측정에 따른 측방향 스케일 오차: 0.002 $\mu\text{m}/\text{pixel}$	$\frac{0.002}{\sqrt{3}} * 15.0$ $\approx 0.0173 \mu\text{m}$	사각	50 (상대 불확도 기반 자유도)
모델 피팅 오차	$u_{\Delta z,2}$	PSF의 가우시안 모델 피팅 시 경험적 최대 오차: 1.4 μm	$\frac{1.4}{\sqrt{3}}$ $\approx 0.8085 \mu\text{m}$	사각	50 (상대 불확도 기반 자유도)
반복 측정	$u_{\Delta z,3}$	11회 측정 시 표준 불확도 (평균: 10.5 μm 표준편차: 0.11067 μm)	$\frac{0.11067}{\sqrt{11}}$ $\approx 0.0350 \mu\text{m}$	t 분포	10


*측정 측방향 스케일: $\frac{Z_{\text{total}}}{N_{\text{pixel}}} = \frac{700 \mu\text{m}}{1000 \text{pixel}} = 0.7 \mu\text{m}/\text{pixel}$

*측정 측방향 스케일 적용 전 측정 평균 FWHM: 15.0 pixel, 표준편차: 0.1581 pixel

2) 합성표준불확도

$$u_{\Delta z} = \sqrt{u_{\Delta z,1}^2 + u_{\Delta z,2}^2 + u_{\Delta z,3}^2} = 0.8102 \mu\text{m}$$

3) 유효 자유도 및 확장불확도

	연구장비 성능평가 절차서 공간섭단층영상 장비의	절차서 등록번호	PE-OCT-001-2025
		제·개정번호	01
	해상도 및 민감도 성능평가 절차서	제정일	2025.08.13
		최종 개정·확인일	2025.08.13

$$\nu_{eff} = \frac{u_c^4}{\sum \left(\frac{u_i^4}{\nu_i} \right)} \approx 50.41$$

$$U = k \times u_c = 2.00 \times 0.8102 \approx 1.62 \mu\text{m}$$

4) 최종 결과 보고

거울 신호 측정 기반 축방향 해상도:

$$\Delta z = (10.50 \pm 1.62) \mu\text{m} \text{ (신뢰의 수준 약 95\%, 포함 인자 } k \approx 2.01 \text{)}$$

5) 불확도 총괄표

성분	표준불확도 $u(x_i)$	확률 분포형태	감도계수 $ c_i $	기여량 $ c_i u(x_i)$	자유도 ν_i
축방향 스케일 오차	0.0173 μm	사각	1	0.0173 μm	50
피팅 모델 오차	0.8085 μm	사각	1	0.8085 μm	50
반복 측정에 의한 오차	0.0350 μm	t-분포	1	0.0350 μm	10
합성표준불확도				0.8102 μm	50.41
확장불확도 (k=2.01)				1.62 μm	

8.3 이론적 횡방향 해상도 산출의 불확도 분석

1) 불확도 요인 정의

1-1) 중심 파장의 불확도(u_{λ_0}) 계산

=> 8.1.1의 1-1)과 동일

중심 파장의 불확도:

$$u_{\lambda_0} = \sqrt{u_{\lambda_{0,1}}^2 + u_{\lambda_{0,2}}^2 + u_{\lambda_{0,3}}^2 + u_{\lambda_{0,4}}^2} = 0.5797 \text{ nm}$$

중심 파장의 자유도:

$$\nu_{\lambda_0} = \frac{u_c^4}{\sum \left(\frac{u_i^4}{\nu_i} \right)} \approx 10.10$$

KRISs	연구장비 성능평가 절차서	절차서 등록번호	PE-OCT-001-2025
	공간섭단층영상 장비의	제·개정번호	01
	해상도 및 민감도 성능평가 절차서	제정일	2025.08.13
		최종 개정·확인일	2025.08.13

1-2) 축방향 스테이지 위치 이동에 의한 불확도

불확도 성분	기호	설명	불확도 값	확률 분포 형태	자유도 ν_i
축방향 스테이지 위치 이동 오차	u_z	스테이지 마이크로 미터 분해능 고려 $\pm 5 \mu\text{m}$	$\frac{5}{\sqrt{3}}$ $\approx 2.8867 \mu\text{m}$	사각	10 (상대 불확도 기반 자유도)

1-3) 빔 반경 측정에 의한 불확도

불확도 성분	기호	설명	불확도 값	확률 분포 형태	자유도 ν_i
빔 프로파일러 센서 분해능에 의한 오차	$u_{w,1}$	사용한 빔 프로파일러의 센서 사양: $2.2 \mu\text{m} \times 2.2 \mu\text{m}$ (3120×2048) pixels	$\frac{2.2}{\sqrt{12}}$ $\approx 0.6351 \mu\text{m}$	사각	10 (상대 불확도 기반 자유도)
광 정렬 불량으로 인한 측정 오프셋	$u_{w,2}$	광 정렬 장치 정확도 및 실험적 경험 기반: $\pm 3 \mu\text{m}$	$\frac{3}{\sqrt{3}}$ $\approx 1.7321 \mu\text{m}$	사각	10 (상대 불확도 기반 자유도)
모델 피팅 오차	$u_{w,3}$	가우시안 모델 적용 시 RMS residual 데이터 고려: $\pm 3 \mu\text{m}$	$\frac{3}{\sqrt{3}}$ $\approx 1.7321 \mu\text{m}$	사각	10 (상대 불확도 기반 자유도)

빔 반경 측정의 불확도:

$$u_w = \sqrt{u_{w,1}^2 + u_{w,2}^2 + u_{w,3}^2} = 2.5301 \mu\text{m}$$

빔 반경 측정의 자유도:

$$\nu_{\lambda_0} = \frac{u_c^4}{\sum \left(\frac{u_i^4}{\nu_i} \right)} \approx 22.58$$

2) 입력값 및 감도계수

$$\lambda_0 = 1312.6 \text{ nm}$$

$$w = 66.91 \mu\text{m}$$

$$z = 5000 \mu\text{m}$$

$$c_1 = \frac{\partial \Delta x}{\partial \lambda_0} = \zeta \frac{z}{w} \approx 27.6491$$

KRISs	연구장비 성능평가 절차서	절차서 등록번호	PE-OCT-001-2025
	공간섭단층영상 장비의	제·개정번호	01
	해상도 및 민감도 성능평가 절차서	제정일	2025.08.13
		최종 개정·확인일	2025.08.13

$$c_2 = \frac{\partial \Delta x}{\partial z} = \zeta \frac{\lambda_0}{w} \approx 0.007258$$

$$c_3 = \frac{\partial \Delta x}{\partial w} = -\zeta \frac{\lambda_0}{w^2} z \approx 0.5424$$

3) 기여량 및 합성표준 불확도

기여량:

$$(|c_1| \times u_{\lambda_0})^2 = (27.6491 \times 0.0005797)^2 = (0.01602)^2 \mu\text{m}^2 = 0.0002569 \mu\text{m}^2$$

$$(|c_2| \times u_z)^2 = (0.007258 \times 2.8867)^2 = (0.02095)^2 \mu\text{m}^2 = 0.0004389 \mu\text{m}^2$$

$$(|c_3| \times u_w)^2 = (0.5424 \times 2.5301)^2 = (1.3723)^2 \mu\text{m}^2 = 1.8832 \mu\text{m}^2$$

합성표준불확도:

$$u_c = \sqrt{(|c_1| u_{\lambda_0})^2 + (|c_2| u_z)^2 + (|c_3| u_w)^2} = 1.3725 \mu\text{m}$$

4) 유효 자유도 및 확장불확도

$$\nu_{eff} = \frac{u_c^4}{\sum \left(\frac{u_i^4}{\nu_i} \right)} \approx 22.60$$

$$U = k \times u_c = 2.071 \times 1.3725 \approx 2.84 \mu\text{m}$$

5) 최종 결과 보고

빔 프로파일 분석 기반 이론 횡방향 해상도:

$$\Delta x = (21.44 \pm 2.84) \mu\text{m} \quad (\text{신뢰의 수준 약 95\%, 포함 인자 } k \approx 2.07)$$

6) 불확도 총괄표

성분	표준불확도 $u(x_i)$	확률 분포형태	감도계수 $ c_i $	기여량 $ c_i u(x_i)$	자유도 ν_i
중심 파장 측정	0.0005797 μm	사각	27.6491	0.01602 μm	2.025
축방향 스테이지 측정	2.8867 μm	사각	0.007258	0.02095 μm	10
빔 반경 측정	2.5301 μm	사각	0.5424	1.3723 μm	22.58
합성표준불확도				1.3725 μm	22.60
확장불확도 (k=2.071)				2.84 μm	

KRISs	연구장비 성능평가 절차서	절차서 등록번호	PE-OCT-001-2025
	공간섭단층영상 장비의	제·개정번호	01
	해상도 및 민감도 성능평가 절차서	제정일	2025.08.13
		최종 개정·확인일	2025.08.13

8.4 금속 엣지 측정 기반 횡방향 해상도 불확도 분석

1) 불확도 요인 정의

불확도 성분	기호	설명	불확도 값	확률 분포 형태	자유도 ν_i
횡방향 스케일 오차	$u_{\Delta x,1}$	해상도 타겟의 라인 선포 기반 스케일 오차: $\pm 0.36 \mu\text{m}/\text{pixel}$	$\frac{0.36}{\sqrt{3}} * 6.77$ $\approx 1.41 \mu\text{m}$	사각	12.5 (상대 불확도 기반 자유도)
보간 추정 오차	$u_{\Delta x,2}$	보간 위치 오차 $\pm 0.5 \text{ pixel}$	$\frac{3}{\sqrt{3}} \times \frac{\sqrt{2}}{1.56}$ $\approx 1.57 \mu\text{m}$	사각	13.7 (상대 불확도 기반 자유도)
기준선 추정 오차	$u_{\Delta x,3}$	기준선 평균값 계산 구간에서 측정된 표준오차 기반 불확도	$1.97 \mu\text{m}$	정규	19
반복 측정	$u_{\Delta x,4}$	11회 측정 시 표준 불확도 (평균: $25.60 \mu\text{m}$ 표준편차: $1.01 \mu\text{m}$)	$\frac{1.01}{\sqrt{10}}$ $\approx 0.32 \mu\text{m}$	t 분포	10

*측정 횡방향 스케일: $\frac{X_{\text{total}}}{N_{\text{pixel}}} = \frac{2000 \mu\text{m}}{330 \text{ pixel}} \approx 6 \mu\text{m}/\text{pixel}$

2) 합성표준불확도

$$u_{\Delta x} = \sqrt{u_{\Delta x,1}^2 + u_{\Delta x,2}^2 + u_{\Delta x,3}^2 + u_{\Delta x,4}^2} = 2.92 \mu\text{m}$$

3) 유효 자유도 및 확장불확도

$$\nu_{\text{eff}} = \frac{u_c^4}{\sum \left(\frac{u_i^4}{\nu_i} \right)} \approx 40.35$$

$$U = k \times u_c = 2 \times 2.92 \approx 5.84 \mu\text{m}$$

4) 최종 결과 보고

금속 엣지 측정 기반 실제 횡방향 해상도:

$$\Delta x = (25.60 \pm 5.84) \mu\text{m} \text{ (신뢰의 수준 약 95\%, 포함 인자 } k \approx 2.00 \text{)}$$

KRISs	연구장비 성능평가 절차서	절차서 등록번호	PE-OCT-001-2025
	공간섭단층영상 장비의	제·개정번호	01
	해상도 및 민감도 성능평가 절차서	제정일	2025.08.13
		최종 개정·확인일	2025.08.13

5) 불확도 총괄표

성분	표준불확도 $u(x_i)$	확률 분포형태	감도계수 $ c_i $	기여량 $ c_i u(x_i)$	자유도 ν_i
횡방향 스케일 오차	1.41 μm	사각	1	1.41 μm	12.5
보간 추정 오차	1.57 μm	사각	1	1.57 μm	13.7
기준선 추정 오차	1.97 μm	정규	1	1.97 μm	19
반복 측정에 의한 오차	0.32 μm	t 분포	1	0.32 μm	10
합성표준불확도				2.92 μm	40.35
확장불확도 (k=2.00)				5.84 μm	

8.5 민감도 측정 불확도 분석

1) 불확도 요인 정의

불확도 성분	기호	설명	불확도 값	확률 분포 형태	자유도 ν_i
신호 측정	u_S	평균 신호 S의 11회 반복 측정 (평균:0.9479 표준편차: 0.0087)	$\frac{0.0087}{\sqrt{11}}$ ≈ 0.002623	t 분포	10
노이즈 측정	u_N	평균 노이즈 N의 11회 반복 측정 (평균: 6.64×10^{-5} 표준편차: 9.0×10^{-6})	$\frac{9.0 \times 10^{-6}}{\sqrt{11}}$ $\approx 2.713 \times 10^{-6}$	t 분포	10

2) 입력값 및 감도계수

신호 평균: $S_m = 0.9479$

신호 표준편차: $S_{std} = 0.0087$

노이즈 평균: $N_m = 6.64 \times 10^{-5}$

노이즈 표준편차: $N_{std} = 9.0 \times 10^{-6}$

$$c_1 = \frac{\partial \text{SNR}}{\partial S} = \frac{1}{N_m} \approx 15060.24$$

$$c_2 = \frac{\partial \text{SNR}}{\partial N} = -\frac{S_m}{N_m^2} \approx -214994012.2$$

KRISs	연구장비 성능평가 절차서	절차서 등록번호	PE-OCT-001-2025
	공간섭단층영상 장비의	제·개정번호	01
	해상도 및 민감도 성능평가 절차서	제정일	2025.08.13
		최종 개정·확인일	2025.08.13

3) 기여량 및 합성표준불확도

기여량:

$$(|c_1| \times u_S)^2 = (15060.24 \times 0.002623)^2 = (39.5030)^2 = 1560.49$$

$$(|c_2| \times u_N)^2 = (214994012.2 \times 0.000002713)^2 = (583.2787)^2 = 340214.04$$

합성 표준불확도:

$$u_c = \sqrt{(|c_1| u_S)^2 + (|c_2| u_N)^2} = 584.61$$

4) 유효 자유도 및 확장 불확도

$$\nu_{eff} = \frac{u_c^4}{\sum \left(\frac{u_i^4}{\nu_i} \right)} \approx 10.08$$

$$U = k \times u_c = 2.23 \times 584.61 \approx 1303.68$$

5) dB 로그 스케일의 민감도 및 측정 불확도 변환

OCT의 민감도는 실제로 로그 스케일 (dB)로 정의되며, 다음과 같이 계산된다:

$$SNR_{dB} = 20 \times \log_{10} \left(\frac{S_m}{N_m} \right) = 20 \times \log_{10}(SNR)$$

$$\frac{df}{dx} = \frac{d}{dx} (20 \times \log_{10}(x)) = \frac{20}{x \ln(10)} \quad \text{이므로,}$$

로그 스케일에서의 표준 불확도는 다음과 같다.

$$u_{dB} = \left| \frac{df}{dx} \right| u = \frac{20}{\ln(10)} \times \frac{u}{SNR} = 8.6859 \times \frac{584.61}{14275.60} = 0.3557 \text{ dB}$$

로그 스케일에서의 확장 불확도는 다음과 같다.

$$U_{dB} = k \times u_{dB} = 2.23 \times 0.3557 \approx 0.79 \text{ dB}$$

6) 최종 결과 보고

로그 스케일: $SNR_{dB} = (76.41 \pm 0.79) \text{ dB}$ (신뢰의 수준 약 95%, 포함 인자 $k \approx 2.23$)

(레일리 분포 노이즈 보정 -6.68 dB 적용)

KRISs	연구장비 성능평가 절차서	절차서 등록번호	PE-OCT-001-2025
	공간섭단층영상 장비의	제·개정번호	01
	해상도 및 민감도 성능평가 절차서	제정일	2025.08.13
		최종 개정·확인일	2025.08.13

7) 불확도 총괄표

성분	표준불확도 $u(x_i)$	확률 분포형태	감도계수 $ c_i $	기여량 $ c_i u(x_i)$	자유도 ν_i
신호 측정	0.002623	t 분포	1	39.5030	10
노이즈 측정	0.000002713	t 분포	1	583.2787	10
합성표준불확도				584.61	10.08
확장불확도 (k=2.23)				1303.68	

9. 평가 결과서 작성방법

평가 결과서에 일반적으로 포함해야 할 사항은 다음과 같다.

- (1) 평가기관명 및 의뢰기관명
- (2) 평가번호
- (3) 평가일자
- (4) 평가환경: OCT 장비 시험 측정 당시 주변 온도 및 습도
- (5) 평가 대상 OCT 장비의 제작사, 모델 및 일련 번호
- (6) OCT 측정에 사용된 반사체 및 해상도 타겟의 제작사 및 모델
- (7) 측정에 사용된 광 스펙트럼 분석기 및 빔 프로파일러의 제작사 및 모델
- (8) 측정 시 OCT 측정 조건
- (9) 평가에 사용한 시험절차서명 또는 방법
- (10) 평가결과
- (11) 기타 의견 및 참고사항

10. 유효성 검증방법

- 교정용 표준기 또는 인증표준물질 이용
- 다른 교정·시험, 표준물질제조 인증방법으로 획득한 결과와의 비교
- 교정/시험기관 간 비교 및 숙련도 시험
- 결과에 영향을 미치는 요인에 대한 체계적인 검토
- 결과에 대한 측정불확도 평가
- 기타 유효화 방법 _____

KRISs	연구장비 성능평가 절차서	절차서 등록번호	PE-OCT-001-2025
	공간섭단층영상 장비의 해상도 및 민감도 성능평가 절차서	제·개정번호	01
		제정일	2025.08.13
		최종 개정·확인일	2025.08.13

11. 기타

11.1 가우시안 스펙트럼과 비가우시안 스펙트럼 구분 지표 관련

스펙트럼의 형태가 명확하지 않은 경우, 다음 표의 3가지 정량 지표 중 2개 이상을 만족하는 경우를 가우시안 스펙트럼으로, 그렇지 않으면 비가우시안 스펙트럼으로 구분하여 이론식 적용이 가능하다.

1) 가우시안 함수 피팅 및 결정계수(R^2) 확인:

- 광원의 스펙트럼에 대해 1차원 가우시안 함수로 curve fitting 수행하여 적합도(R^2)가 0.95 이상인 경우

2) 왜도(Skewness) 및 첨도(Kurtosis) 평가:

- 왜도(skewness) ≈ 0 , 첨도(kurtosis) ≈ 3 인 경우

3) 스펙트럼의 FWHM 기준 좌우 대칭성 평가:

- 좌우 반치점 (half-maximum points)에서 중심 파장 대비 파장 거리의 차이를 계산하여 이 차이가 스펙트럼의 FWHM의 5% 이하인 경우

11.2 참고문헌

- [1] Drexler, W., & Fujimoto, J. G. (Eds.). (2008). Optical Coherence Tomography: Technology and Applications. Springer.
- [2] Leitgeb, R., Unterhuber, A., Schmall, T., & Drexler, W. (2003). "Ultrahigh resolution Fourier domain optical coherence tomography." Optics Express, 12(10), 2156-2165.
- [3] Yun, S. H., Tearney, G. J., de Boer, J. F., Iftimia, N., & Bouma, B. E. (2003). High-speed optical frequency-domain imaging. Optics Express, 11(22), 2953-2963.

[별첨] 성적서 작성 예시

[별첨 1] 연구장비 성능평가 결과서 작성 예시

[별첨 2] 연구장비 성능평가 결과서 표지 예시

KRISs	연구장비 성능평가 절차서	절차서 등록번호	PE-OCT-001-2025
	공간섭단층영상 장비의	제·개정번호	01
	해상도 및 민감도 성능평가 절차서	제정일	2025.08.13
		최종 개정·확인일	2025.08.13

[별첨1] 연구장비 성능평가 결과서 작성 예시

<h2 style="margin: 0;">연구장비 성능평가 결과서</h2>			
<h3 style="margin: 0;">PERFORMANCE EVALUATION REPORTS</h3>			
평가번호(Cer. No.) :20XX-OCT-XX	(2) 쪽 중 (1) 쪽		
<p>1. 의뢰자</p> <p>기관명 : ###</p> <p>주 소 : ###</p> <p>2. 평가항목</p> <p>품 명 : 공간섭단층영상 장비의 해상도 및 민감도 성능 평가</p> <p>제작회사 : ###</p> <p>모 델 명 : ###</p> <p>3. 평가일자 : 20##. ##. ## ~ 20##. ##. ##</p> <p>4. 평가환경</p> <p style="margin-left: 40px;">온 도 : (23 ± 1)°C 상대습도 : (50 ± 5)%</p> <p style="margin-left: 40px;">평가장소 : <input type="checkbox"/> 성능평가실험실 <input type="checkbox"/> 현장</p> <p style="margin-left: 20px;">-OCT 측정에 사용된 반사체 제작사 및 모델: Gold mirror (Edmund, #45-606)</p> <p style="margin-left: 20px;">-OCT 측정에 사용된 해상도 타겟 제작사 및 모델: USAF1951 (Thorlabs, R3L1S4P1)</p> <p style="margin-left: 20px;">-측정에 사용된 광 스펙트럼 분석기 제작사 및 모델: Anritsu MS9740B</p> <p style="margin-left: 20px;">-측정에 사용된 빔 프로파일러 제작사 및 모델: Newport, LBP2-HR</p> <p>5. 평가방법</p> <p>평가방법은 한국표준과학연구원 발행 “공간섭단층영상 장비의 해상도 및 민감도 성능 평가 절차”를 준수하여 수행하였다.</p> <p>6. 평가결과 : 별첨 연구장비성능평가 결과서 참조</p>			
확인	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%; border-right: 1px solid black; padding: 5px;"> 작성자 : 직 위 : 성 명 : (서명) </td> <td style="width: 50%; padding: 5px;"> 승인자 직 위 : 성 명 : (서명) </td> </tr> </table>	작성자 : 직 위 : 성 명 : (서명)	승인자 직 위 : 성 명 : (서명)
작성자 : 직 위 : 성 명 : (서명)	승인자 직 위 : 성 명 : (서명)		
<p style="text-align: center;">위 평가결과는 20XX년 과학기술정보통신부 과학기술사업화진흥원의 “연구산업육성사업(연구산업체계구축) 연구장비 성능평가 위탁사업”으로 수행한 것입니다.</p> <p style="text-align: center; font-weight: bold; font-size: 1.2em;">한국표준과학연구원장</p> <p style="text-align: center;">대전시 유성구 가정로 267, 042-868-5000</p>			

KRISS	연구장비 성능평가 절차서	절차서 등록번호	PE-OCT-001-2025
	공간섭단층영상 장비의	제·개정번호	01
	해상도 및 민감도 성능평가 절차서	제정일	2025.08.13
		최종 개정·확인일	2025.08.13

연구장비 성능평가 결과서

PERFORMANCE EVALUATION REPORTS

평가번호(Cer. No.) :20XX-OCT-XX

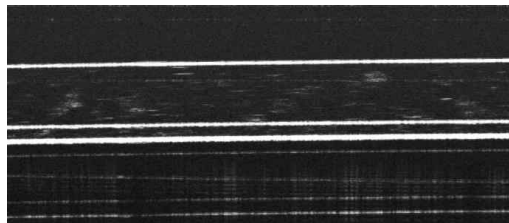
(2) 쪽 중 (2) 쪽

■ **평가결과 :**

● **축방향 해상도 (Axial Resolution)**

구분	해상도 (μm)	확장불확도	비고
샘플 측정 기반	10.50	1.62 μm ($k \approx 2.01$)	거울 기반 PSF 측정
스펙트럼 기반	7.81	0.21 μm ($k \approx 2.22$)	광 스펙트럼 기반 계산

※참고: 다층 구조(3중) 샘플 측정 이미지 (4mm×1.8mm)



● **횡방향 해상도 (Transverse Resolution)**

구분	해상도 (μm)	확장불확도	비고
샘플 측정 기반	25.60	5.84 μm ($k \approx 2.00$)	금속 Edge 측정 기반
빔 분포 기반	21.44	2.84 μm ($k \approx 2.07$)	빔 프로파일 분석 기반

● **민감도 (Sensitivity)**

구분	민감도 (dB)	확장불확도	비고
거울 신호 기반	76.41	0.79 dB ($k \approx 2.23$)	레이리 분포 노이즈 보정 적용(-6.68dB)

※참고: 유효감지깊이: 3.23 mm

이상 끝.


KRISS	연구장비 성능평가 절차서	절차서 등록번호	PE-OCT-001-2025
		제·개정번호	01
	공간섭단층영상 장비의 해상도 및 민감도 성능평가 절차서	제정일	2025.08.13
		최종 개정·확인일	2025.08.13

[별첨 2] 연구장비 성능평가 결과서 표지 예시

연구장비 성능평가 결과서

연구장비성능평가 장비명	
신청 기업명	

20XX년 00월 00일



이 문서는 「연구산업진흥법」 제8조제1항 및 같은 법 시행령 제10조제3항에 따른 연구장비성능평가 결과서로 평가기관의 사전승인 없이는 문서의 일부분만을 발췌·인용하여 사용하거나 배포할 수 없습니다.

KRISS	연구장비 성능평가 절차서	절차서 등록번호	PE-OCT-001-2025
		제·개정번호	01
	공간섭단층영상 장비의	제정일	2025.08.13
	해상도 및 민감도 성능평가 절차서	최종 개정·확인일	2025.08.13

<목 차>

1. 성능평가 개요
 - 1.1. 성능평가 장비의 개요 및 구성
 - 1.2. 성능평가 수행 일정
2. 성능평가 신청 정보
 - 2.1. 성능평가 신청 개요
 - 2.2. 성능평가 세부 사양서
 - 2.3. 성능평가 항목 제안서
3. 성능평가 항목 및 항목별 기준
4. 성능평가 수행 방법 및 절차
5. 성능평가 결과
 - 5.1. 해당 장비의 성능평가 결과
 - 5.2. 비교 장비의 성능평가 결과
 - 5.3. 성능평가 항목별 적합성
6. 최종 결론
7. 참고 문헌
8. 특이사항

※ 성능평가 신청 장비의 유형·특성에 따라 결과서의 목차는 일부 변동될 수 있습니다.