

광학 검사 시스템 핵심 파라미터 및 수식 체계 기술 보고서

문서번호 CRSM-AI-2026-AUTO

작성일 2026-06-09

작성 Cressem AI 시스템 (자동 생성)

보안등급 사내 비밀 (Confidential)

버전 v1.0

목 차

광학 검사 시스템 핵심 파라미터 및 수식 체계 기술 보고서	3
개요/배경	3
광학 해상도(Resolution) 산출 원리	3
이미지 센서 화소(Pixel) 특성 분석	5
검사 마진(Inspection Margin) 설계	7
이미지 농도 및 대비(Contrast) 분석	8
신호 대 잡음비(SNR) 및 품질 지표	10
종합 검토 및 설계 적용 가이드	12
결론/시사점	13

광학 검사 시스템 핵심 파라미터 및 수식 체계 기술 보고서

반도체 검사 장비의 정밀도를 결정하는 광학 해상도, 화소 특성, 신호 품질 및 검사 마진 산출을 위한 핵심 수식 체계를 정의합니다. 본 보고서는 고정밀 비전 검사 솔루션 설계를 위한 엔지니어링 가이드를 제공합니다.

개요/배경

최근 반도체 산업의 패러다임이 전공정(Front-end)의 미세화 공정에서 후공정(Back-end)의 고도화된 패키징(Advanced Packaging) 기술로 급격히 이동함에 따라, HBM(High Bandwidth Memory), FC-BGA(Flip Chip Ball Grid Array), 그리고 2.5D/3D 적층 구조와 같은 초미세 패턴 검사의 중요성이 그 어느 때보다 강조되고 있습니다 [출처: 분석_크레셈CRESSEM20260509001.pdf]. 특히 HBM4와 같은 차세대 제품에서 도입될 Hybrid Bonding(구리 직접 접합) 기술은 기존의 Bump 방식보다 훨씬 높은 수준의 정밀도를 요구하며, 이는 검사 장비의 광학 설계 단계에서부터 극도로 정밀한 파라미터(Parameter) 산출이 선행되어야 함을 의미합니다 [출처: 분석_크레셈CRESSEM20260509001.pdf].

반도체 검사 장비의 성능은 단순히 결함을 발견하는 것을 넘어, 미세한 결함(Defect)과 정상적인 노이즈를 정확히 구분하여 과검(Over-kill)률을 최소화하는 데 있습니다 [출처: 분석_크레셈CRESSEM20260509001.pdf]. 이를 달성하기 위해서는 광학계의 물리적 한계인 해상도(Resolution)부터 이미지 센서의 화소(Pixel) 특성, 그리고 신호의 품질을 결정하는 신호 대 잡음비(SNR, Signal-to-Noise Ratio) 및 대비(Contrast)에 이르기까지 다양한 광학적·전기적 변수들이 유기적으로 결합되어야 합니다.

본 기술 보고서는 고정밀 광학 검사 시스템을 설계하고 운용함에 있어 핵심이 되는 주요 파라미터들의 수학적 정의와 수식 체계를 정립하는 것을 목적으로 합니다. 구체적으로는 레일리 한계(Rayleigh Criterion)에 기반한 해상도 산출식, 센서의 물리적 해상도를 결정하는 화소 면적식, 공정 산포를 반영한 검사 마진(Inspection Margin) 설계식, 결함의 가시성을 결정하는 농도비(Contrast Ratio)식, 그리고 최종적인 신호 품질 지표인 SNR 산출식을 체계적으로 제시합니다.

이러한 수식 체계의 정립은 단순한 이론적 검토를 넘어, 실제 검사 장비의 광학 엔진(Optical Engine) 설계 시 Tact Time(생산 주기)을 극대화하면서도 검출 성능을 최상으로 유지할 수 있는 엔지니어링 가이드를 제공할 것입니다 [출처: 분석_크레셈CRESSEM20260509001.pdf]. 결과적으로 본 보고서는 차세대 반도체 패키징 검사 시장에서 요구되는 초미세 결함 검출 능력을 확보하기 위한 기술적 토대를 구축하고자 합니다.

광학 해상도(Resolution) 산출 원리

반도체 패키징 검사, 특히 HBM(High Bandwidth Memory)의 TSV(Through-Silicon Via)나 FC-BGA의 미세 Bump를 검사하는 공정에서 광학 시스템의 해상도(Resolution)는 결함 검출의 성패를 가르는 가장 근본적인 물리적 한계치입니다. 검사 장비가 대상물의 미세 패턴을 개별적인 객체로 분리하여 인식할 수 있는 능력을 의미하며, 이는 단순히 화소(Pixel)의 크기에 의해 결정되는 것이 아니라 광학계의 물리적 설계 특성에 의해 결정됩니다.

1. 레일리 한계(Rayleigh Criterion)와 해상도의 물리적 정의

광학계에서 두 개의 인접한 점광원(Point Source)이 있을 때, 이들이 회절(Diffraction) 현상에 의해 형성하는 에어리 원판(Airy Disk)이 서로 겹치게 되면 인간의 눈이나 이미지 센서(Image Sensor)는 이를 하나의 점으로 인식하게 됩니다. 이때 두 점을 별개의 객체로 구분할 수 있는 최소한의 거리를 정의한 것이 바로 레일리 한계(Rayleigh Criterion)입니다.

반도체 검사 장비의 초정밀 광학 설계에서는 이 레일리 한계를 기준으로 시스템의 이론적 해상도 한계를 설정합니다. 만약 검사하고자 하는 패턴의 선폭(Critical Dimension, CD)이 이 해상도 한계보다 작다면, 아무리 고해상도의 카메라를 사용하더라도 물리적인 회절 한계로 인해 패턴의 형상을 왜곡하거나 결함을 놓치는 '미검(Under-kill)' 현상이 발생하게 됩니다.

2. 해상도 결정 핵심 수식: $R = 0.61\lambda / NA$

광학 해상도(R)를 결정하는 가장 핵심적인 수식은 다음과 같습니다.

$$R = (0.61\lambda) / (NA)$$

이 수식은 해상도가 결정되는 세 가지 핵심 변수 간의 상관관계를 명확히 보여줍니다.

(1) 파장 (λ , Wavelength)

λ 는 광원의 파장을 의미합니다. 수식에서 볼 수 있듯이 해상도(R)는 파장에 비례합니다. 즉, 파장이 짧을수록(Short Wavelength) 분모가 커지는 효과가 아닌 분자가 작아지는 효과를 통해 R 값이 작아지게 되며, 이는 더 높은 해상도(더 미세한 분해능)를 얻을 수 있음을 의미합니다.

- **실무 적용:** 반도체 검사 공정에서 미세 패턴 검사를 위해 가시광선(Visible Light) 영역을 넘어 UV(Ultra-Violet) 광원을 사용하는 이유가 바로 이 파장 단축을 통한 해상도 향상에 있습니다.

(2) 개구수 (NA, Numerical Aperture)

NA는 대물렌즈가 빛을 모을 수 있는 능력을 나타내는 수치로, 렌즈의 구경(Aperture)과 렌즈와 시료 사이의 굴절률(n) 및 입사각(θ)에 의해 결정됩니다. $NA = n \sin \theta$ 로 정의됩니다.

- **실무 적용:** NA 값이 클수록(High NA) 분모가 커지므로 해상도 R은 작아져(더 정밀해져) 성능이 향상됩니다. HBM의 고단 적층 구조를 검사할 때는 렌즈와 웨이퍼 사이의 거리(Working Distance)를 극도로 제한하더라도 높은 NA를 확보할 수 있는 고성능 광학 설계가 필수적입니다.

(3) 상수 (0.61)

0.61은 에어리 원판의 첫 번째 암점(First Minimum) 위치를 계산하기 위한 수학적 상수입니다. 이는 회절 패턴의 물리적 특성을 반영한 값입니다.

3. 해상도 향상을 위한 광학 설계 전략 분석

반도체 검사 장비 설계 시, 위 수식을 기반으로 다음과 같은 기술적 트레이드오프(Trade-off)를 고려해야 합니다.

설계 변수	해상도 향상 방향	장점	단점 및 제약 사항
파장 (λ) 감소	UV 광원 도입	물리적 해상도 한계 극복 가능	광원의 출력 저하, 렌즈 소재의 UV 투과율 문제, 결함의 흡수율 변화
개구수 (NA) 증가	대구경 렌즈 사용	미세 패턴 분해능 극대화	초점 심도(Depth of Field, DOF) 급격히 감소, Working Distance 확보 어려움

표 1.

초점 심도(DOF)와의 상관관계:

해상도를 높이기 위해 NA를 키우면, 필연적으로 초점 심도($DOF \approx k1 \cdot \lambda / NA^2$)가 제곱에 반비례하여 급격히 감소합니다. 이는 HBM과 같이 칩이 수직으로 적층된 구조에서 특정 층의 Bump를 검사할 때, 초점이 맞지 않는

영역(Out-of-focus)이 넓어지는 문제를 야기합니다. 따라서 크레셈의 차세대 검사 솔루션은 '고해상도(High Resolution)'와 '넓은 초점 심도(Large DOF)'라는 상충하는 목표를 동시에 달성하기 위해 고도의 광학 알고리즘과 정밀 스테이지 제어 기술을 결합해야 합니다.

4. 결론 및 엔지니어링 시사점

결론적으로, 광학 해상도는 단순한 수치가 아니라 검사 장비의 성능 한계를 규정하는 물리적 경계선입니다. $R = 0.61\lambda / NA$ 수식에 근거하여, 차세대 HBM4 및 Hybrid Bonding 공정 대응을 위해서는 다음과 같은 설계 방향이 요구됩니다.

1. **단파장 광원 최적화:** UV 및 Deep-UV 영역의 광원을 활용하여 λ 를 최소화함.

2. **High NA 광학계 설계:** 렌즈의 수차(Aberration)를 제어하면서도 최대한의 NA를 확보할 수 있는 고정밀 렌즈 시스템 구축.

3. **DOF 보완 기술:** NA 증가로 인한 DOF 감소를 극복하기 위해, 다중 초점(Multi-focus) 촬영 기술 또는 AI 기반의 이미지 합성(Image Stitching/Fusion) 기술을 적용하여 유효 검사 영역을 확보함.

이러한 광학적 근거는 향후 진행될 §3 이미지 센서 화소 특성 및 §4 검사 마진 설계의 기초 데이터로 활용됩니다.

광학 해상도 결정 프로세스 및 물리적 메커니즘

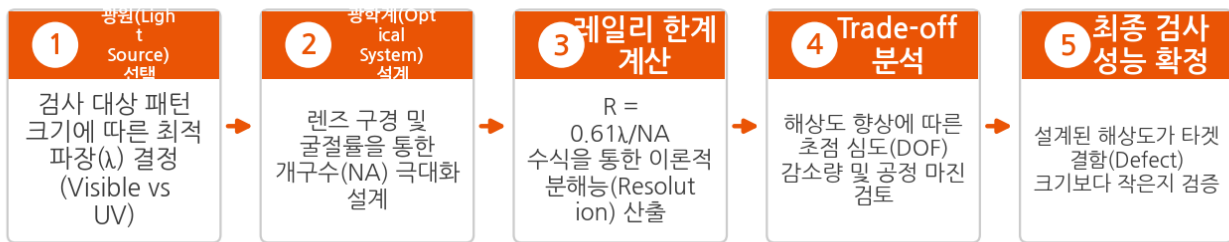


그림 1.

이미지 센서 화소(Pixel) 특성 분석

반도체 패키징 검사 장비, 특히 HBM(High Bandwidth Memory)이나 FC-BGA(Flip Chip Ball Grid Array)와 같은 초미세 패턴 검사 시스템에서 이미지 센서의 화소(Pixel) 특성은 검사 가능한 최소 결함 크기와 검사 속도(Tact Time)를 결정짓는 핵심적인 물리적 요소입니다. 광학계가 아무리 높은 해상도(Resolution)를 구현하더라도, 이를 수집하는 이미지 센서의 화소 구조가 뒷받침되지 않으면 데이터의 손실이 발생하여 실질적인 검사 성능을 확보할 수 없습니다. 본 섹션에서는 화소 면적(Pixel Area)의 물리적 정의와 샘플링 이론(Sampling Theory)을 기반으로 한 유효 검사 영역 및 해상도 간의 상관관계를 심도 있게 분석합니다.

1. 화소 면적(Pixel Area) 및 물리적 규격 산출

이미지 센서의 각 화소는 빛을 전기적 신호로 변환하는 수광부(Photodiode)를 포함하며, 이 화소의 물리적 크기는 검사 시스템의 감도(Sensitivity)와 신호 대 잡음비(SNR)에 직접적인 영향을 미칩니다. 화소의 크기는 일반적으로 가로(Pitch)와 세로(Pitch)의 곱으로 정의되며, 정사각형 화소를 사용하는 일반적인 반도체 검사용 CMOS/CCD 센서에서는 다음과 같은 수식 체계를 따릅니다.

[화소 면적(Pixel Area) 산출식]

$$A_{\text{pixel}} = P_x \times P_y$$

(단, Apixel: 화소 면적, Px: 가로 화소 피치, Py: 세로 화소 피치)

검사 장비 설계 시 화소 면적을 결정하는 데에는 상충하는(Trade-off) 두 가지 핵심 요소가 존재합니다.

- **수광량 및 SNR 측면:** 화소 면적(Apixel)이 넓을수록 동일한 노출 시간(Exposure Time) 동안 더 많은 광자(Photon)를 수집할 수 있습니다. 이는 신호의 강도를 높여 SNR을 개선하고, 어두운 영역의 미세 결함(Dark Defect)을 검출하는 데 유리합니다.
- **공간 해상도 및 샘플링 측면:** 화소 면적이 넓어지면 개별 화소가 담당하는 물리적 영역이 커지므로, 단위 면적당 화소 수(Pixel Density)가 낮아집니다. 이는 나이퀴스트 샘플링 이론(Nyquist Sampling Theorem)에 따라 표현 가능한 공간 주파수의 한계를 낮추어, 미세 패턴의 해상도를 저하시키는 원인이 됩니다.

2. 샘플링 이론(Sampling Theory)에 따른 유효 검사 영역 산출

광학 검사 시스템에서 특정 패턴이나 결함을 왜곡 없이 재현하기 위해서는 센서의 화소 크기가 광학계의 해상도보다 충분히 작아야 합니다. 이를 위해 나이퀴스트(Nyquist) 샘플링 이론을 적용하여, 검사 대상의 공간 주파수 성분을 디지털 이미지로 변환할 때 발생하는 에일리어싱(Aliasing) 현상을 방지해야 합니다.

[샘플링 및 유효 해상도 관계식]

검사 시스템이 목표로 하는 최소 결함 크기(dmin)를 안정적으로 검출하기 위해서는, 해당 결함이 최소 2개 이상의 화소에 걸쳐 샘플링되어야 합니다. 이를 위해 설계 시 적용되는 샘플링 배수(Sampling Factor)를 고려한 식은 다음과 같습니다.

$$P_{pitch} \leq (d_{min}) / (N)$$

(단, Ppitch: 화소 피치, dmin: 목표 결함 크기, N: 샘플링 계수, 일반적으로 $N \geq 2$)

또한, 센서의 전체 화소 수(Ntotal)와 이미지 센서의 물리적 크기(W × H)를 통해 산출되는 유효 검사 영역(Field of View, FOV)은 장비의 검사 효율성을 결정하는 지표가 됩니다.

항목	정의 및 수식	검사 성능에 미치는 영향
Pixel Pitch (P)	$\sqrt{\text{Apixel}}$ (정사각형 기준)	해상도 한계 및 광학적 샘플링 성능 결정
Sampling Rate	$1 / (2 \times P)$	나이퀴스트 한계에 따른 최대 검출 가능 주파수
Effective FOV	$N_{\text{pixel}} \times P$	1회 촬영 시 확보 가능한 검사 영역의 크기

표 2.

3. 화소 특성과 검사 정밀도의 상관관계 분석

HBM과 같은 고단 적층 구조에서는 TSV(Through Silicon Via)나 Bump의 미세한 Misalignment(정렬 오류)를 검출해야 하므로, 화소의 크기는 단순히 작은 것이 아니라 광학계의 해상도(R)와 정밀하게 동기화되어야 합니다. 만약 광학 해상도($R = 0.61\lambda / NA$)가 $1\mu\text{m}$ 인데 화소 피치가 $2\mu\text{m}$ 라면, 광학계가 아무리 선명한 이미지를 만들어내더라도 센서 단계에서 정보가 뭉개지는 'Under-sampling' 현상이 발생하게 됩니다.

따라서 고정밀 검사 장비 설계 시에는 다음과 같은 설계 가이드를 준수해야 합니다.

1. **Resolution Matching:** 광학계의 해상도(R)와 센서의 화소 피치(P)가 일치하거나, $P < R$ 을 만족하도록 설계하여 센서에 의한 정보 손실을 최소화해야 합니다.

2. **Area vs. Speed:** 화소 면적을 키워 SNR을 확보하면 검사 속도는 빨라질 수 있으나(노출 시간 단축), 미세 결함 검출력은 낮아집니다. 반대로 화소를 줄이면 검사 정밀도는 올라가지만, 광량이 부족해져 검사 속도가 저하되거나 노이즈가 증가할 수 있습니다.

3. **Digital Magnification 고려:** 실제 검사 영역 내에서 화소가 차지하는 비중을 계산하여, 목표로 하는 결함 유형(Bridge, Missing, Misalignment 등)에 최적화된 화소 밀도를 선정해야 합니다 [출처: 매뉴얼HBMAdvancedInspectionSyst20260509001.pdf].

결론적으로, 이미지 센서의 화소 특성 분석은 단순히 고해상도 센서를 채택하는 문제가 아니라, 광학계의 물리적 한계와 샘플링 이론, 그리고 실제 공정에서 요구되는 결함 크기 사이의 최적의 균형점(Sweet Spot)을 찾는 과정입니다.

검사 마진(Inspection Margin) 설계

반도체 패키징 공정, 특히 HBM(High Bandwidth Memory)이나 FC-BGA(Flip Chip Ball Grid Array)와 같은 고밀도 적층 구조에서는 미세한 공정 변동(Process Variation)이 제품의 전기적 특성에 치명적인 영향을 미칩니다. 따라서 검사 시스템 설계 시 단순히 결함의 유무를 판단하는 것을 넘어, 공정 산포(Process Variation)와 측정 시스템의 불확실성을 정량적으로 관리할 수 있는 **검사 마진(Inspection Margin)** 설계가 필수적입니다. 본 섹션에서는 설계 규격(Specification)과 실제 측정값(Measured Value) 사이의 여유치를 정의하는 마진 산출식과 이를 결정하는 주요 변수를 기술합니다.

1. 검사 마진(Inspection Margin)의 정의 및 산출식

검사 마진은 제품이 설계된 사양(Spec) 내에서 얼마나 안정적으로 동작하고 있는지를 나타내는 지표입니다. 이는 단순히 'Pass/Fail'을 나누는 경계값이 아니라, 공정 능력(Process Capability)을 평가하고 차기 공정의 최적화 방향을 제시하는 엔지니어링 데이터로 활용됩니다 [출처: pdfHBMHighBandwidt20260508002.pdf].

검사 마진은 측정 대상의 특성에 따라 다음과 같은 수식 체계로 산출됩니다.

1.1. 전압 및 전기적 특성 마진 (Electrical Margin)

공급 전압(Supply Voltage, VDD)과 같이 특정 허용 범위가 존재하는 항목의 경우, 규격 상한/하한 대비 실제 측정값의 위치를 백분율(%)로 나타냅니다.

$$\text{Margin (\%)} = \left(\frac{\text{Measured Value} - \text{Spec Min}}{\text{Spec Max} - \text{Spec Min}} \right) \times 100$$

또는 규격의 편차(Δ)를 기준으로 다음과 같이 정의할 수 있습니다.

$$\text{Margin (\%)} = \frac{\text{Measured Value} - \text{Spec Nominal}}{\text{Spec Tolerance}} \times 100$$

예를 들어, HBM의 VDD 규격이 $1.1\text{V} \pm 5\%$ 이고 측정값이 1.102V라면, 규격 중심값(Nominal) 대비 +0.18%의 마진을 확보한 것으로 간주하여 'Pass' 판정을 내립니다 [출처: pdfHBMHighBandwidt20260508002.pdf].

1.2. 신호 무결성 마진 (Signal Integrity Margin)

Eye Diagram 분석을 통해 산출되는 신호 마진은 신호의 수직적 여유치인 **Eye Height**와 수평적 여유치인 **Eye Width**로 구분됩니다.

- **Eye Height Margin:** $\text{MarginH} = \text{Measured Eye Height} - \text{Min. Eye Height Spec}$

- **Eye Width Margin:** $\text{MarginW} = \text{Measured Eye Width} - \text{Min. Eye Width Spec}$

이 마진이 클수록 외부 노이즈(Noise)나 지터(Jitter)에 대한 내성이 강함을 의미합니다.

2. 공정 산포 및 오차 고려 요소 (Tolerance & Variation)

정밀한 마진 설계를 위해서는 검사 시스템 자체의 오차와 제조 공정에서 발생하는 변동성을 반드시 통합적으로 고려해야 합니다.

구분	주요 변수 (Parameters)	영향 분석 (Impact Analysis)
공정 산포 (Process Variation)	TSV 도금 두께, Bump 높이 편차, Die Bonding 압력	적층 구조의 전기적 저항(Ω) 및 정렬 상태(μm) 변동 유발
측정 오차 (Measurement Error)	광학 해상도 한계, 스테이지 정밀도, 센서 노이즈	실제 결함(Defect)을 정상으로 판단하거나(Under-kill), 정상 제품을 결함으로 판단(Over-kill)하는 원인
환경적 변동 (Environmental Variation)	온도($^{\circ}\text{C}$), 습도, 정전기(ESD)	열팽창에 의한 Warpage(휨) 발생 및 신호 전송 속도 저하 유발

표 3.

3. 설계 마진 최적화를 위한 엔지니어링 가이드

검사 마진은 '최대화'하는 것이 이상적이지만, 실제 양산 라인에서는 **수율(Yield)**과 **검사 속도(Tact Time)** 사이의 트레이드오프(Trade-off)를 고려해야 합니다.

1. **Tolerance(공차) 기반의 가드밴드(Guard-band) 설정**: 측정 시스템의 불확실성(Uncertainty)을 고려하여, 고객사 규격(Spec)보다 다소 엄격한 내부 관리 규격(Internal Control Limit)을 설정해야 합니다. 이는 측정 오차로 인해 불량품이 유출되는 것을 방지하기 위함입니다.

2. 결함 유형별 마진 차등 적용:

- **Misalignment(정렬 오류)**: Bump 또는 TSV의 위치 오차가 설계 임계치에 근접할 경우, Die Bonding 공정 파라미터 재점검을 권고하는 마진 관리 체계가 필요합니다 [출처: 매뉴얼HBMAAdvancedInspectionSyst20260509001.pdf].
- **Bridge(Short)**: Solder 과다 도포로 인한 인접 Bump 간 연결 위험은 전기적 저항(Ω) 마진의 급격한 감소로 나타나므로, 실시간 모니터링이 중요합니다 [출처: 매뉴얼HBMAAdvancedInspectionSyst20260509001.pdf].

3. **데이터 기반의 피드백 루프**: 검사 과정에서 확보된 마진 데이터를 분석하여, 특정 Lot에서 마진이 지속적으로 감소하는 경향(Trend)이 보일 경우 공정 이상(Root Cause Analysis)을 사전에 예측하는 스마트 팩토리 솔루션으로 연계해야 합니다 [출처: 분석_크레셈CRESSEM20260509001.pdf].

이미지 농도 및 대비(Contrast) 분석

반도체 패키징 검사, 특히 HBM(High Bandwidth Memory)이나 FC-BGA(Flip Chip Ball Grid Array)의 미세 Bump 및 TSV(Through Silicon Via) 결함을 검출하는 과정에서 광학 시스템의 해상도(Resolution)만큼이나 중요한 요소가 바로 이미지의 대비(Contrast) 성능입니다. 아무리 해상도가 높은 광학계를 구축하더라도, 배경(Background)과 결함(Defect) 간의 밝기 차이가 충분하지 않으면 비전 알고리즘은 이를 유의미한 신호로 인식하지 못하고 노이즈로 간주하여 미검(Under-kill)을 발생시키기 때문입니다.

1. 이미지 농도비(Contrast Ratio) 및 변조도(Modulation)의 정의

광학 검사 시스템에서 결함 검출 성능을 정량적으로 평가하기 위해서는 이미지 내의 밝기 변화량을 나타내는 **농도비(Contrast Ratio)**와 **변조도(Modulation)**에 대한 명확한 수식 체계가 필요합니다. 이는 검사 대상인 패턴(Pattern)의 밝기(I_{max})와 배경의 밝기(I_{min}) 사이의 관계를 정의합니다.

가. 농도비(Contrast Ratio) 산출식

이미지 상에서 특정 결함이나 패턴이 주변 배경과 얼마나 뚜렷하게 구분되는지를 나타내는 지표입니다. 일반적으로 다음과 같은 수식으로 정의됩니다.

$$\text{Contrast Ratio} = (I_{\text{max}} - I_{\text{min}}) / (I_{\text{max}} + I_{\text{min}})$$

여기서 I_{max} 는 패턴 또는 결함 부위의 최대 휘도(Luminance)를 의미하며, I_{min} 은 배경 또는 결함이 없는 영역의 최소 휘도를 의미합니다. 이 값이 1(또는 100%)에 가까울수록 결함의 형상이 배경으로부터 명확하게 분리됨을 뜻하며, 검사 장비의 검출 한계(Detection Limit)를 결정짓는 핵심 파라미터가 됩니다.

나. 변조도(Modulation)와 대비(Contrast)

광학계의 성능을 나타낼 때 사용하는 변조도(Modulation)는 광학적 전달 함수(MTF, Modulation Transfer Function)와 밀접한 관련이 있습니다. 공간 주파수(Spatial Frequency)에 따른 이미지의 대비 변화를 측정하며, 미세 패턴 검사에서는 다음과 같은 관계를 가집니다.

$$\text{Modulation}(f) = (I(f)_{\text{max}} - I(f)_{\text{min}}) / (I(f)_{\text{max}} + I(f)_{\text{min}})$$

이 수식은 특정 주파수(f)에서 광학계가 얼마나 선명한 이미지를 전달할 수 있는지를 나타냅니다. HBM의 미세한 Bump 정렬(Misalignment)이나 Bridge 결함을 검출하기 위해서는 고주파 영역에서도 높은 변조도를 유지하는 광학 설계가 필수적입니다.

2. 결함 검출 성능과 농도비의 상관관계

검사 시스템의 성능은 단순히 '보이는 것'을 넘어, '알고리즘이 판정할 수 있는가'의 문제로 귀결됩니다. 크레셈의 AI 비전 솔루션과 같은 **Deep Learning 기반 결함 분류** 기술에서도 이미지의 대비는 입력 데이터의 품질을 결정하는 결정적 요소입니다.

구분	고대비(High Contrast) 환경	저대비(Low Contrast) 환경
신호 특성	$I_{\text{max}} \gg I_{\text{min}}$ (명확한 차이)	$I_{\text{max}} \approx I_{\text{min}}$ (미세한 차이)
알고리즘 영향	특징 추출(Feature Extraction) 용이	노이즈와 결함의 혼재 (Over-kill/Under-kill 위험)
검출 한계	높은 SNR과 결합하여 미세 결함 검출 가능	높은 해상도에서도 결함 인지 불가능
주요 원인	최적화된 조명 및 광학계 설계	산란광(Stray Light), 불충분한 광량, 불량한 반사율

표 4.

결함 검출의 임계값(Threshold)을 설정할 때, 농도비가 낮으면 배경 노이즈(Background Noise)를 결함으로 오인하는 **과검(Over-kill)**이 발생하거나, 반대로 결함을 노이즈로 판단하여 놓치는 **미검(Under-kill)**이 발생할 확률이 급격히 높아집니다. 따라서 검사 장비 설계 단계에서 목표로 하는 결함의 크기와 형태에 맞는 최소 농도비(Minimum Contrast Threshold)를 사전에 정의해야 합니다.

3. 광학적 대비 향상을 위한 설계 고려사항

이미지 농도를 최적화하여 높은 대비를 확보하기 위해서는 다음과 같은 공학적 접근이 요구됩니다.

1. **조명 시스템(Lighting System) 최적화**: 결함의 재질(금속 Bump vs 절연체 Substrate)에 따른 반사율 차이를 극대화하기 위해 **동축조명(Coaxial Lighting)** 또는 **저각 조명(Low-angle Lighting)**을 선택적으로 사용해야 합니다.

이는 I_{max}와 I_{min}의 격차를 벌리는 가장 직접적인 방법입니다.

2. **산란광 제어**: 불필요한 산란광은 I_{min} 값을 상승시켜 전체적인 농도비를 저하시킵니다. 이를 방지하기 위해 렌즈의 코팅 기술과 암실(Dark box) 구조 설계가 병행되어야 합니다.

3. **MTF(Modulation Transfer Function) 관리**: 해상도(R)가 높더라도 주파수가 높아짐에 따라 변조도가 급격히 떨어지면 실제 이미지의 대비는 낮아지게 됩니다. 따라서 설계 단계에서 목표 패턴 주파수에서의 MTF 값을 검증하여 실질적인 검사 성능을 보장해야 합니다.

결론적으로, 이미지 농도 및 대비 분석은 단순한 시각적 확인을 넘어, 검사 장비의 **수율(Yield) 향상**과 직결되는 정량적 지표입니다. 크레셈은 이러한 수식 체계를 바탕으로 고정밀 광학 엔진을 설계하여, HBM과 같은 초미세 패키징 공정에서도 안정적인 결함 검출 성능을 제공하고 있습니다.

신호 대 잡음비(SNR) 및 품질 지표

반도체 패키징 검사 공정, 특히 HBM(High Bandwidth Memory)의 TSV(Through Silicon Via) 연결성 검사나 FC-BGA의 미세 Bump 검사에서는 초미세 결함을 검출하기 위한 극도로 높은 신호 품질이 요구됩니다. 검사 시스템의 성능은 단순히 광학적 해상도(Resolution)에만 의존하는 것이 아니라, 검출하고자 하는 신호(Signal)가 배경 잡음(Noise)으로부터 얼마나 명확하게 분리되는지를 나타내는 신호 대 잡음비(SNR, Signal-to-Noise Ratio)에 의해 결정적인 영향을 받습니다. 본 섹션에서는 검사 시스템의 신호 품질을 정량화하는 SNR 산출식과 노이즈 플로어(Noise Floor) 분석, 그리고 이를 통한 결함 검출 한계에 대해 심도 있게 다룹니다.

1. SNR(Signal-to-Noise Ratio)의 정의 및 수학적 모델

SNR은 검사 대상으로부터 반사되거나 투과되어 센서에 도달하는 유효 신호의 강도와, 시스템 내부 및 외부 환경에서 발생하는 불필요한 잡음의 강도 간의 비율을 의미합니다. 반도체 검사 장비의 광학 엔진에서 SNR은 결함(Defect)의 존재 여부를 판별하는 가장 핵심적인 지표입니다.

1.1. SNR 산출 기본 수식

SNR은 일반적으로 신호의 평균 전력(또는 진폭)을 잡음의 평균 전력(또는 진폭)으로 나눈 값으로 정의됩니다. 검사 시스템의 특성에 따라 선형 스케일(Linear Scale)과 데시벨(dB, Decibel) 스케일로 나누어 표현합니다.

• Linear Scale SNR:

$$SNR_{linear} = (P_{signal}) / (P_{noise})$$

여기서 P_{signal}은 결함 또는 특정 패턴으로부터 유래된 신호의 전력이며, P_{noise}는 잡음의 전력입니다.

• Decibel (dB) Scale SNR:

공학계산 및 시스템 성능 비교의 편의성을 위해 로그 스케일을 사용합니다.

$$SNR_{dB} = 10 \cdot \log_{10} \left((P_{signal}) / (P_{noise}) \right)$$

만약 전력이 아닌 전압(Voltage)이나 진폭(Amplitude) 단위를 사용할 경우, $20 \cdot \log_{10}$ 을 적용합니다.

1.2. 신호 및 잡음 성분의 세부 구성

검사 시스템에서 측정되는 총 잡음(Total Noise)은 단일 성분이 아닌, 여러 물리적 요인이 결합된 복합적인 형태를 띕니다. 이를 수식으로 표현하면 다음과 같습니다.

$$P_{noise_{total}} = P_{shot} + P_{dark} + P_{read} + P_{photon}$$

1. **Shot Noise (P_{shot})**: 광자의 입자성(Particle nature)에 의해 발생하는 통계적 변동성입니다. 광량(Photon flux)이 많아질수록 증가하며, $P_{shot} \propto \sqrt{I}$ (여기서 I는 빛의 세기)의 관계를 갖습니다.

2. **Dark Current Noise (Pdark)**: 빛이 없는 상태에서도 열 에너지에 의해 센서 내 전자가 생성되는 현상입니다. 온도가 상승할수록 급격히 증가하므로, 고온 동작 환경(예: 95°C 이상의 HBM 테스트 환경)에서는 정밀한 열 관리가 필수적입니다 [출처: pdfHBMHighBandwidth20260508002.pdf].

3. **Readout Noise (Pread)**: 이미지 센서의 ADC(Analog-to-Digital Converter) 및 회로 설계 과정에서 발생하는 전기적 잡음입니다.

4. **Photon Noise (Pphoton)**: 조명 시스템의 불안정성이나 광원의 미세한 떨림에 의해 발생하는 잡음입니다.

2. 노이즈 플로어(Noise Floor)와 검출 한계

노이즈 플로어(Noise Floor)는 시스템이 감지할 수 있는 가장 낮은 잡음 수준을 의미합니다. 검사 시스템의 설계 목표는 결함으로부터 오는 신호 레벨이 이 노이즈 플로어보다 충분히 높게 형성되도록 하는 것입니다.

2.1. 결함 검출 가능 조건 (Detection Threshold)

특정 결함을 성공적으로 검출하기 위해서는 결함 신호의 크기가 노이즈의 통계적 변동 범위(Standard Deviation, sigma)를 초과해야 합니다. 이를 통계적 유의성 관점에서 정의하면 다음과 같습니다.

$$S_{\text{defect}} > k \cdot \sigma_{\text{noise}}$$

여기서 k 는 신뢰 수준을 결정하는 계수(Confidence factor)입니다. 일반적으로 $k=3$ (99.7% 신뢰도) 또는 $k=5$ 이상의 값을 적용하여 과검(Over-kill)과 미검(Under-kill) 사이의 최적점을 찾습니다. 만약 S_{defect} 가 노이즈 플로어 근처에 머물게 되면, AI 비전 알고리즘이 이를 결함이 아닌 정상적인 노이즈로 오인하여 미검이 발생하거나, 반대로 노이즈를 결함으로 인식하는 과검이 발생하게 됩니다 [출처: 분석_크레셈CRESSEM20260509001.pdf].

2.2. 노이즈 플로어 하락을 위한 엔지니어링 전략

검사 장비의 성능을 극대화하기 위해 다음과 같은 기술적 접근이 필요합니다.

- **광학적 최적화**: 고해상도 카메라와 정밀 조명 제어 기술을 결합하여 신호의 대조(Contrast)를 높이고, 불필요한 산란광을 억제하여 잡음을 최소화합니다 [출처: 분석_크레셈CRESSEM20260509001.pdf].
- **열 관리(Thermal Management)**: 센서의 Dark Current를 억제하기 위해 냉각 시스템을 도입하거나, 검사 중 발생하는 열이 센서에 미치는 영향을 최소화하는 설계가 필요합니다.
- **AI 기반 노이즈 필터링**: Deep Learning 알고리즘을 통해 단순 Rule-based 검사로는 구분하기 어려운 미세 결함과 정상 노이즈를 분류함으로써, 실질적인 유효 SNR을 높이는 효과를 거둘 수 있습니다 [출처: 분석_크레셈CRESSEM20260509001.pdf].

3. SNR과 검사 성능의 상관관계 요약

검사 시스템의 최종 성능 지표인 수율(Yield) 향상을 위해서는 SNR 관리가 필수적입니다. 아래 표는 SNR 변화에 따른 검사 품질의 변화를 요약한 것입니다.

SNR 수준	신호 품질 상태	결함 검출 특성	주요 리스크
Low SNR	신호가 잡음에 묻힘	결함 식별 불가	미검 (Under-kill): 불량품이 양품으로 판정됨
Moderate SNR	신호와 잡음의 경계	결함 식별이 불안정함	과검 (Over-kill): 노이즈를 결함으로 오인함
High SNR	신호가 매우 명확함	고정밀 결함 검출 가능	최적 상태: 높은 수율과 신뢰성 확보

표 5.

결론적으로, HBM4와 같은 차세대 공정에서 요구되는 Hybrid Bonding 검사나 초미세 패턴 검사에서는 기존보다 훨씬 높은 SNR 확보가 필수적이며, 이를 위해 광학 엔진의 하드웨어적 성능과 AI 기반의 소프트웨어적 처리 능력이 통합된 솔루션이 요구됩니다.

SNR 및 신호 품질 분석 프로세스

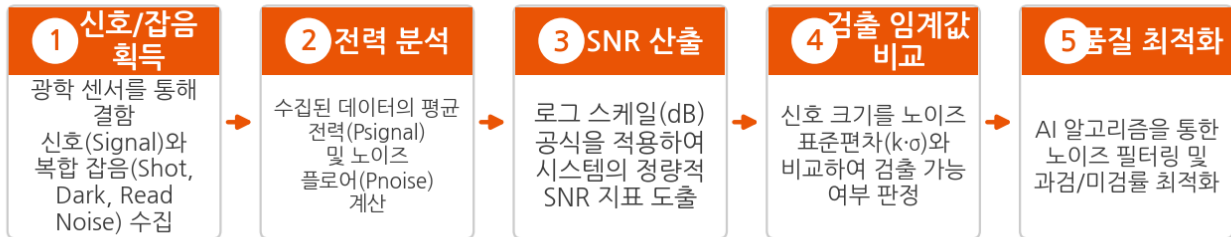


그림 2.

종합 검토 및 설계 적용 가이드

본 섹션에서는 앞서 기술한 광학 해상도(Resolution), 화소 특성(Pixel Characteristics), 검사 마진(Inspection Margin), 농도비(Contrast Ratio), 그리고 신호 대 잡음비(SNR) 간의 유기적인 상관관계를 분석하고, 이를 실제 HBM 및 FC-BGA 검사 장비 설계 시 어떻게 최적화(Optimization)할 것인지에 대한 실무적 가이드를 제시한다.

1. 광학 및 이미지 센서 파라미터 간의 상관관계 분석 (Correlation Analysis)

검사 장비의 성능은 단일 파라미터의 극대화가 아닌, 각 파라미터 간의 상충 관계(Trade-off)를 정밀하게 제어하는 최적화 과정에서 결정된다. 각 수식 체계 사이에는 다음과 같은 핵심적인 물리적·수학적 연결 고리가 존재한다.

가. 해상도(Resolution)와 화소 크기(Pixel Size)의 정합성

레이리 한계(Rayleigh Criterion)에 의해 결정되는 광학 해상도 $R = 0.61\lambda / NA$ 는 시스템이 물리적으로 식별할 수 있는 최소 크기를 정의한다. 그러나 실제 검사 성능은 이미지 센서의 화소 크기(P)에 의해 제한되는 샘플링 이론(Sampling Theory)을 따른다. 나이퀴스트(Nyquist) 샘플링 이론을 충족하기 위해서는 최소한 $P \leq R/2$ 를 만족해야 하며, 만약 광학 해상도보다 화소 크기가 크다면 시스템은 '화소 제한(Pixel-limited)' 상태가 되어 고해상도 광학계를 갖추고도 결함을 놓치는 결과를 초래한다.

나. 농도비(Contrast)와 SNR의 상호 의존성

결함 검출의 핵심은 결함 부위와 배경(Background) 사이의 농도비(Contrast Ratio)를 확보하는 것이다. 하지만 농도비가 높더라도 신호 대 잡음비(SNR)가 낮으면, 노이즈가 결함 신호를 덮어버려(Noise Masking) 오검(False Call) 또는 미검(Escape)이 발생한다. 특히 미세 패턴 검사에서는 결함의 크기가 작아 신호 강도 자체가 매우 낮기 때문에, 높은 농도비를 유지하면서도 충분한 SNR을 확보하기 위한 광학적 설계가 필수적이다.

다. 검사 마진(Margin)과 시스템 신뢰성

설계 마진은 공정 산포(Δ)와 측정 오차(epsilon)를 포함하는 개념으로, $\text{Margin} = \text{Spec} - (\text{Measured} + \Delta + \text{epsilon})$ 의 구조를 갖는다. 해상도가 높을수록(R 감소), 그리고 SNR이 높을수록(SNR 증가) 측정 오차(epsilon)가 감소하여 결과적으로 공정 마진을 더 넓게 확보할 수 있는 설계적 여유를 제공한다.

2. 검사 장비 설계 최적화 가이드 (Design Optimization Guide)

HBM(High Bandwidth Memory) 및 FC-BGA와 같은 차세대 패키징 검사 장비 설계 시, 엔지니어는 다음과 같은 우선순위에 따라 파라미터를 조정해야 한다.

설계 목표	주요 조절 파라미터 (Primary Drivers)	고려해야 할 트레이드오프 (Trade-offs)
초미세 결함 검출	NA 증대, λ 단축, 화소 크기(P) 축소	NA 증가 시 심도(Depth of Field) 감소, λ 단축 시 광량 감소로 인한 SNR 저하
고속 검사 (High Throughput)	광량(Illumination Intensity) 증대, 센서 노출 시간(t) 단축	광량 증대 시 열 발생 및 Warpage 영향, 노출 시간 단축 시 SNR 급격히 저하
고신뢰성 (Low Over-kill)	SNR 극대화, 농도비(C) 최적화	SNR 향상을 위한 고출력 조명 사용 시 광학계 오염 및 부품 수명 단축

표 6.

[실무 적용 전략]

1. HBM TSV 및 Bump 검사 시:

HBM의 고단 적층 구조에서는 미세한 Misalignment와 Bridge 결함을 잡아내는 것이 관건이다. 이를 위해 NA를 높여 해상도를 확보하되, 좁아진 초점 심도(Depth of Field)를 극복하기 위해 스테이지의 정밀 제어와 함께, SNR을 보전할 수 있는 고휘도 조명 시스템을 결합해야 한다. 특히 TSV의 저항(Ω) 측정과 연계된 전기적 특성 검사 시, 광학적 결함 데이터와 전기적 데이터를 통합 분석하여 결함의 근본 원인(Root Cause)을 추적하는 것이 중요하다 [출처: 매뉴얼HBMAAdvancedInspectionSyst20260509001.pdf].

2. FC-BGA 미세 회로 패턴 검사 시:

기판의 미세 회로(Pattern) 검사에서는 패턴의 단선/단락을 판별하기 위한 농도비(Contrast) 확보가 최우선이다. 조명 각도와 파장을 최적화하여 패턴 경계면에서의 산란광을 제어함으로써 농도비를 극대화하고, 이를 통해 검사 마진을 확보하여 공정 변동성에도 안정적인 수율(Yield) 관리가 가능하도록 설계해야 한다 [출처: 분석_크레셈CRESSEM20260509001.pdf].

3. 설계 시 핵심 고려사항 요약

- **System Integration:** 광학계(Optics), 이미지 센서(Sensor), 조명(Lighting), 그리고 AI 비전 알고리즘(AI Vision Algorithm)이 하나의 폐루프(Closed-loop) 시스템으로 작동해야 한다. 단순히 하드웨어 스펙을 높이는 것이 아니라, AI 알고리즘이 낮은 SNR 환경에서도 결함을 분류할 수 있도록 하드웨어와 소프트웨어의 균형을 맞추는 것이 크레셈의 핵심 경쟁력이다 [출처: 분석_크레셈CRESSEM20260509001.pdf].
- **Environmental Stability:** 고해상도 검사일수록 온도 변화에 따른 열팽창(ΔL)이 해상도 및 마진에 미치는 영향이 크다. 따라서 검사 환경의 온도 관리($^{\circ}\text{C}$) 및 장비 자체의 열 관리(Thermal Management) 설계가 수반되어야 한다.
- **Data-Driven Optimization:** 검사 과정에서 발생하는 Defect Map과 Pass/Fail 데이터를 축적하여, 실제 공정 마진과 설계 마진 사이의 괴리를 지속적으로 피드백(Feedback)하는 스마트 팩토리 구현 기반의 설계 프로세스가 요구된다 [출처: 분석_크레셈CRESSEM20260509001.pdf].

결론/시사점

본 보고서에서 고찰한 광학 해상도(Resolution), 화소 특성(Pixel Characteristics), 검사 마진(Inspection Margin), 농도비(Contrast Ratio), 그리고 신호 대 잡음비(SNR)의 수식 체계는 반도체 검사 장비의 성능을 결정짓는 핵심적인 물리적 지표들이다. 각 파라미터는 독립적으로 존재하는 것이 아니라, 상호 유기적인 상관관계를 맺으며 검사 시스템의 최종적인 검출 능력(Detection Capability)을 형성한다.

차세대 반도체 패키징 기술인 HBM(High Bandwidth Memory) 및 FC-BGA(Flip Chip Ball Grid Array) 공정의 고도화에 따라, 검사 시스템이 직면한 기술적 요구사항은 다음과 같이 요약되며 이에 따른 설계 전략이 필요하다.

1. 초미세 패턴 대응을 위한 해상도 및 화소 설계 고도화

HBM의 TSV(Through Silicon Via) 및 FC-BGA의 Micro Bump 검사는 수 μm 단위 이하의 미세 구조를 다룬다. 레일리 한계(Rayleigh Criterion)에 따른 해상도($R = 0.61\lambda / \text{NA}$)를 극대화하기 위해서는 고개구수(High NA) 광학계 설계가 필수적이며, 이는 동시에 피사계 심도(Depth of Field, DOF)의 감소를 초래한다. 따라서 화소 면적(Pixel Area)을 최적화하여 샘플링 이론에 따른 에일리어싱(Aliasing)을 방지하고, 해상도와 DOF 사이의 트레이드오프(Trade-off)를 정밀하게 제어하는 설계가 요구된다.

2. 신호 품질(Signal Quality) 확보를 통한 결함 검출력 강화

패키징 공정의 미세화는 결함의 크기(Defect Size)를 줄임과 동시에 결함과 배경 간의 농도비(Contrast Ratio)를 낮추는 결과를 초래한다. 이는 곧 신호 대 잡음비(SNR)의 저하로 이어져 과검(Over-kill) 또는 미검(Under-kill)의 원인이 된다. 따라서 고성능 이미지 센서 채택과 더불어, 노이즈를 최소화할 수 있는 조명 제어 기술 및 AI 기반의 결함 분류 알고리즘을 통합하여 유효한 검사 마진(Inspection Margin)을 확보해야 한다.

3. 미래 로드맵: Hybrid Bonding 및 차세대 공정 선점

HBM4 이후 도입될 Hybrid Bonding(구리 직접 접합) 기술은 기존 Bump 방식보다 훨씬 높은 정밀도의 검사를 요구한다. 크레셈은 현재의 광학 검사 기술을 넘어, 초미세 간극을 측정할 수 있는 차세대 검사 모듈 개발에 집중함으로써 시장 주도권을 확보할 전략을 가지고 있다 [출처: 분석_크레셈CRESSEM20260509001.pdf]. 단순한 불량 검출을 넘어, 검사 데이터를 분석하여 공정상의 불량 원인을 역추적(Root Cause Analysis)할 수 있는 데이터 분석 솔루션을 제공함으로써 고객사의 수율(Yield) 향상에 기여하는 파트너로 진화해야 한다 [출처: 분석_크레셈CRESSEM20260509001.pdf].

결론적으로, 차세대 검사 장비 설계의 핵심은 물리적 광학 한계(Optical Limit) 내에서 신호의 품질을 극대화하고, 공정 산포를 수용할 수 있는 충분한 설계 마진을 확보하는 데 있다. 크레셈은 고정밀 광학 기술과 AI 비전 솔루션을 결합하여, 급변하는 AI 반도체 공급망 내에서 대체 불가능한 검사 솔루션 리더로서의 위치를 공고히 할 것이다.