

# 광학 검사 시스템 핵심 성능 지표(KPI) 및 수식 분석 기술

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 성능 지표(KPI) 및 수식 분석 기술 보고서   | 3  |
| 개요/배경 . . . . .                          | 3  |
| 광학 해상도(Resolution) 분석 . . . . .          | 3  |
| 화소 면적(Pixel Area) 및 샘플링 이론 . . . . .     | 5  |
| 검사 마진(Inspection Margin) 산출 모델 . . . . . | 6  |
| 농도비(Contrast Ratio) 및 이미지 품질 . . . . .   | 8  |
| 신호 대 잡음비(SNR) 및 노이즈 제어 . . . . .         | 10 |
| 종합 성능 상관관계 분석 . . . . .                  | 12 |
| 결론/시사점 . . . . .                         | 13 |

## 광학 검사 시스템 핵심 성능 지표(KPI) 및 수식 분석 기술 보고서

반도체 검사 장비의 광학 성능을 결정하는 5가지 핵심 수식(해상도, 화소 면적, Margin, 농도비, SNR)을 정의하고, 각 지표가 검사 정밀도 및 수율에 미치는 기술적 상관관계를 분석합니다.

### 개요/배경

최근 반도체 산업의 패러다임이 전공정(Front-end)의 미세화 공정을 넘어, 후공정(Back-end)의 고도화된 패키징 기술인 어드밴스드 패키징(Advanced Packaging)으로 급격히 이동함에 따라, 검사 장비의 정밀도 요구사항 또한 기하급수적으로 높아지고 있습니다 [출처: 분석\_크레셈CRESSEM20260509001.pdf]. 특히 HBM(High Bandwidth Memory)의 고단 적층 기술과 FC-BGA(Flip Chip Ball Grid Array)의 미세 회로 패턴화가 가속화되면서, 기존의 단순 불량 유무 판별을 넘어선 초정밀 광학 검사 솔루션의 중요성이 대두되고 있습니다 [출처: 분석\_크레셈CRESSEM20260509001.pdf].

반도체 패키징 공정 내에서는 TSV(Through Silicon Via)의 연결성, Die-to-Die의 정렬 상태(Misalignment), 그리고 미세 Bump의 형성 상태를 검증하기 위해 고해상도 광학 엔진과 AI 비전 알고리즘이 결합된 시스템이 필수적으로 사용됩니다 [출처: 매뉴얼HBMAAdvancedInspectionSyst20260509001.pdf]. 이 과정에서 검사 시스템의 성능을 객관적으로 정의하고 정량화하기 위한 핵심 성과 지표(KPI, Key Performance Indicator)의 설정은 장비의 신뢰성과 직결됩니다. 만약 광학 시스템의 해상도(Resolution)가 불충분하거나 신호 대 잡음비(SNR)가 낮을 경우, 미세 결함을 정상 노이즈로 오인하는 과검(Over-kill)이나 실제 결함을 놓치는 미검(Under-kill)이 발생하여 고객사의 수율(Yield)에 치명적인 영향을 미칠 수 있습니다 [출처: 분석\_크레셈CRESSEM20260509001.pdf].

본 기술 보고서의 목적은 광학 검사 시스템의 성능을 결정짓는 핵심 물리량 및 수리적 모델을 체계적으로 분석하는 데 있습니다. 레일리 한계(Rayleigh Criterion)에 기반한 해상도 산출식부터 화소 면적(Pixel Area), 설계 규격 대비 측정값의 여유치를 나타내는 마진(Margin) 산출식, 그리고 이미지의 명암 차이를 결정하는 농도비(Contrast Ratio) 및 신호 신뢰도를 평가하는 SNR(Signal-to-Noise Ratio) 수식을 각각 독립적인 모델로 제시합니다. 이를 통해 엔지니어가 검사 장비 설계 및 공정 최적화 단계에서 광학 파라미터(Wavelength, NA, Sensor Size 등)를 정밀하게 제어하고, 최종적으로 HBM 및 차세대 패키징 공정에 최적화된 검사 정밀도를 확보할 수 있는 기술적 근거를 제공하고자 합니다.

### 광학 해상도(Resolution) 분석

반도체 패키징 공정이 고도화됨에 따라, HBM(High Bandwidth Memory)의 TSV(Through Silicon Via) 연결 상태나 FC-BGA(Flip Chip Ball Grid Array)의 미세 Bump 정렬을 검사하기 위해서는 극한의 광학 해상도가 요구됩니다. 광학 검사 시스템에서 '해상도(Resolution)'란 시스템이 서로 인접한 두 개의 독립적인 물체를 별개의 개체로 식별할 수 있는 최소한의 물리적 거리를 의미합니다. 본 섹션에서는 광학계의 물리적 한계인 레일리 한계(Rayleigh Criterion)를 중심으로 해상도를 결정짓는 핵심 변수들의 상관관계를 심층 분석합니다.

#### 1. 레일리 한계(Rayleigh Criterion)와 해상도 산출식

광학계에 의해 투영된 두 점 광원(Point Source)의 회절 패턴은 Airy Disk라고 불리는 동심원 형태의 밝기 분포를 가집니다. 두 점이 매우 가까우면 이 패턴들이 중첩되어 하나의 점처럼 보이며, 두 점이 일정 거리 이상 떨어져야만 비로소 개별적인 물체로 인지할 수 있습니다. 이때 두 점의 중심이 첫 번째 Airy Disk의 첫 번째 암부(Null)에 위치할 때를 기준으로 삼는 것이 레일리 한계입니다.

광학 해상도(R)를 결정하는 기본 수식은 다음과 같습니다.

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

여기서 각 파라미터의 물리적 의미와 검사 장비 설계 시의 영향력은 다음과 같습니다.

- **$\lambda$  (Wavelength, 파장):** 사용되는 광원의 파장을 의미합니다. 수식에 따라 파장이 짧을수록 해상도(R) 값은 작아지며(더 미세한 분해능), 이는 곧 더 높은 해상도를 의미합니다. 따라서 미세 패턴 검사를 위해 가시광선 영역 중에서도 단파장(Blue/UV 영역)을 사용하거나, 극자외선(EUV) 기술을 검토하게 됩니다.
- **NA (Numerical Aperture, 개구수):** 렌즈가 빛을 모을 수 있는 능력을 나타내는 무차원 수치입니다.  $NA = n \sin \alpha$  (여기서  $n$ 은 매질의 굴절률,  $\alpha$ 는 빛이 렌즈로 들어오는 최대 반각)로 정의됩니다. NA 값이 커질수록 분모가 커져 해상도(R)는 작아지며, 더 정밀한 검사가 가능해집니다.

## 2. 핵심 파라미터의 영향력 및 설계 트레이드오프(Trade-off)

검사 장비 설계 엔지니어는 해상도를 높이기 위해  $\lambda$ 를 낮추거나 NA를 높이는 전략을 취하지만, 이는 반드시 물리적·공학적 제약 조건을 동반합니다.

### #### 2.1 파장( $\lambda$ ) 제어의 한계

파장을 줄이면 해상도는 개선되지만, 광원의 에너지 밀도가 낮아지고 광학 소자의 코팅 및 소재 기술이 까다로워집니다. 특히 UV(자외선) 영역의 광원을 사용할 경우, 렌즈 소재의 흡수율이 높아져 광량 손실이 발생할 수 있으며, 이는 후술할 SNR(Signal-to-Noise Ratio) 저하로 이어질 수 있습니다.

### #### 2.2 개구수(NA) 확대와 심도(Depth of Field)의 관계

NA를 높이는 것은 해상도 향상을 위한 가장 직접적인 방법입니다. 하지만 NA가 증가하면 초점이 맞는 깊이인 초점 심도(DOF, Depth of Field)는 급격히 감소합니다. 초점 심도 식은 다음과 같습니다.

$$DOF \approx (\lambda)/(NA^2)$$

수식에서 볼 수 있듯이, NA의 제곱에 반비례하여 DOF가 줄어들기 때문에, NA를 높여 해상도를 확보하면 웨이퍼나 기판의 미세한 높이 변화(Warpage 등)에 매우 민감해집니다. 이는 HBM과 같이 적층 구조가 복잡하고 물리적 변형(Warpage)이 발생할 가능성이 높은 제품 검사 시, 초점 유지(Auto-focus) 기술의 난이도를 극도로 높이는 원인이 됩니다.

## 3. 반도체 검사 공정에서의 실무적 시사점

HBM 및 차세대 패키징 검사에서 요구되는 해상도는 단순한 수치를 넘어, 결함의 종류(Defect Type)와 직접적으로 연계됩니다.

| 구분          | 영향 요소            | 검사 품질에 미치는 영향                                            |
|-------------|------------------|----------------------------------------------------------|
| 미세 패턴 검사    | $\lambda$ (단파장화) | 미세 회로(Pattern)의 선폭(CD, Critical Dimension) 측정 정밀도 향상     |
| TSV/Bump 검사 | NA (고개구수)        | 수천 개의 미세 전극(Bump) 간의 간격(Pitch) 및 정렬(Misalignment) 검출력 강화 |
| Warpage 대응  | DOF (심도 확보)      | 고단 적층 시 발생하는 휨 현상에서도 균일한 해상도 유지 필요                       |

표 1.

결론적으로, 고해상도 광학 검사 시스템을 설계할 때는 레일리 한계에 따른 해상도(R) 확보와, NA 증가에 따른 초점 심도(DOF) 감소 사이의 최적점(Sweet Spot)을 찾는 것이 핵심입니다. 특히 크레셈(CRESSEM)의 차세대 검사 솔루션은 이러한 물리적 한계를 극복하기 위해 고성능 광학 엔진과 AI 기반의 이미지 복원 기술을 결합하여, 낮은 DOF 환경에서도 높은 신뢰도의 검사 결과를 도출하는 방향으로 진화하고 있습니다. [출처: 분석\_크레셈CRESSEM20260509001.pdf]



그림 1.

## 화소 면적(Pixel Area) 및 샘플링 이론

반도체 패키징 검사, 특히 HBM(High Bandwidth Memory)이나 FC-BGA(Flip Chip Ball Grid Array)와 같이 미세한 Bump 및 TSV(Through Silicon Via)를 검사해야 하는 공정에서는 광학계의 해상도(Resolution)뿐만 아니라, 이를 디지털 이미지로 변환하는 이미지 센서(Image Sensor)의 화소(Pixel) 특성이 검사 성능을 결정짓는 핵심 요소입니다. 본 섹션에서는 화소 면적(Pixel Area)과 샘플링(Sampling) 이론을 바탕으로, 광학적 해상도가 실제 디지털 데이터로 어떻게 구현되는지, 그리고 검사 정밀도를 확보하기 위한 샘플링 기준을 기술적으로 분석합니다.

### 1. 화소 면적(Pixel Area)과 공간 해상도의 상관관계

이미지 센서의 각 화소는 빛을 받아들이는 수광부(Photodiode)의 크기에 의해 결정되며, 이는 화소 크기(Pixel Size) 또는 화소 간격(Pixel Pitch)으로 정의됩니다. 화소 면적은 단순히 이미지의 크기를 결정하는 것을 넘어, 검사 장비의 공간 해상도(Spatial Resolution) 및 광학적 민감도와 직결됩니다.

#### 1.1 화소 면적(Pixel Area) 산출식

일반적으로 사각형 형태의 화소를 가정할 때, 화소 면적(Apixel)은 다음과 같이 정의됩니다.

$$A_{\text{pixel}} = P \times P = P^2$$

(여기서 P는 Pixel Pitch를 의미함)

#### 1.2 화소 크기가 검사 성능에 미치는 영향

화소 크기는 두 가지 상충하는(Trade-off) 특성을 가집니다.

- **공간 해상도(Spatial Resolution):** 화소 크기가 작을수록 더 미세한 패턴을 구분할 수 있어 해상도가 높아집니다. 하지만 화소가 너무 작아지면 광자(Photon)를 받아들이는 면적이 줄어들어 신호 대 잡음비(SNR)가 저하될 위험이 있습니다.
- **광학적 민감도(Sensitivity):** 화소 면적이 넓을수록 더 많은 빛을 수집할 수 있어 저조도 환경에서도 높은 SNR을 확보할 수 있으나, 이는 미세 결함(Defect)의 식별 능력을 저하시키는 요인이 됩니다.

### 2. 샘플링 이론(Sampling Theory) 및 Nyquist 기준

광학계가 아무리 높은 해상도(R)를 제공하더라도, 이미지 센서의 화소 구조가 이를 충분히 뒷받침하지 못하면 '앨리어싱(Aliasing)' 현상이 발생하여 실제 패턴과 다른 왜곡된 이미지가 생성됩니다. 이를 방지하기 위해 나이퀴스트-샤넌 샘플링 정리(Nyquist-Shannon Sampling Theorem)를 검사 시스템 설계에 적용해야 합니다.

#### 2.1 나이퀴스트 샘플링 기준(Nyquist Sampling Criterion)

연속적인 신호(광학적 패턴)를 디지털 신호(이미지 데이터)로 변환할 때, 신호의 최대 주파수(fmax)보다 최소 2배 이상의 샘플링 주파수(fs)가 필요하다는 원칙입니다. 반도체 검사 장비의 관점에서는, 검사하고자 하는 최소 패턴의 크기(Spatial Frequency)를 화소의 해상도가 충분히 분해할 수 있어야 함을 의미합니다.

## 2.2 샘플링과 해상도의 관계식

광학적 해상도(R)와 화소 간격(P) 사이의 관계를 통해, 특정 패턴을 왜곡 없이 검출하기 위한 최소 화소 밀도를 다음과 같이 검토할 수 있습니다.

- **Nyquist Limit 조건:**  $P \leq (R)/(2)$
- 즉, 검출하고자 하는 최소 해상도 단위가 R일 때, 화소 간격(P)은 그 절반 이하로 설계되어야 정보의 손실 없이 디지털화가 가능합니다.

## 3. 화소 크기와 광학 해상도의 통합 분석

검사 시스템 설계 시, 광학계의 해상도(Resolution)와 센서의 샘플링 능력(Sampling Capability) 간의 불일치는 검사 신뢰도에 치명적인 영향을 미칩니다. 이를 정리하면 아래 표와 같습니다.

| 구분     | 광학 해상도 중심 설계<br>(Optical-Limited) | 화소 샘플링 중심 설계 (Sensor-Limited) |
|--------|-----------------------------------|-------------------------------|
| 주요 목표  | 렌즈의 NA(Numerical Aperture) 극대화    | 화소 크기(Pixel Size) 최소화 및 고밀도화  |
| 장점     | 이론적 한계치에 가까운 미세 패턴 구현 가능          | 광학계의 해상도를 디지털 데이터로 완벽히 복원     |
| 단점/리스크 | 센서 화소가 크면 앨리어싱(Aliasing) 발생       | SNR 저하 및 광량 부족으로 인한 검사 속도 저하  |
| 결과적 현상 | 패턴이 뭉개지거나(Blur) 왜곡됨               | 노이즈가 증가하거나 신호가 약해짐            |

표 2.

### 3.1 결함 검출력(Detectability)에 미치는 영향

HBM의 TSV 연결성이나 미세 Bump의 Misalignment(정렬 오류)를 검사할 때, 화소 면적이 패턴 크기에 비해 너무 크면 결함의 경계면(Edge)이 흐릿해져 정확한 위치 측정이 불가능해집니다. 반대로, 화소는 매우 작지만 광학적 해상도가 낮으면, 센서 데이터는 정밀해 보일지라도 실제 물리적 패턴의 정보가 누락된 '가짜 고해상도(False High-Resolution)' 상태가 됩니다.

따라서 고정밀 검사 시스템 구축을 위해서는 [광학 해상도 → 나이퀴스트 샘플링 기준 준수 → 최적 화소 면적(SNR 확보) → 최종 검출력]으로 이어지는 통합적인 파라미터 최적화가 필수적입니다. 이는 크레셈이 추구하는 AI 기반 결함 분류 및 고속 광학 엔진 기술의 핵심적인 물리적 토대가 됩니다 [출처: 분석\_크레셈CRESSEM20260509001.pdf].

## 검사 마진(Inspection Margin) 산출 모델

반도체 패키징 공정이 HBM(High Bandwidth Memory) 및 FC-BGA(Flip Chip Ball Grid Array)와 같이 고집적·고단 적층 구조로 진화함에 따라, 검사 장비의 성능은 단순히 결함을 '찾는 것'을 넘어 설계 규격(Specification) 내에서 얼마나 안정적인 공정 제어가 가능한지를 입증하는 방향으로 요구되고 있습니다. 검사 마진(Inspection Margin)은 공정 변동성(Process Variation) 속에서도 제품이 설계된 전기적·물리적 특성을 유지할 수 있는 여유치를 의미하며, 이는 검사 장비의 판정 신뢰도 및 고객사 수율(Yield) 관리의 핵심 지표로 활용됩니다.

### 1. 검사 마진(Inspection Margin)의 정의 및 산출 메커니즘

검사 마진은 설계 규격(Specification Limit)과 실제 측정된 값(Measured Value) 사이의 수치적 차이를 의미합니다. 반도체 검사 리포트에서 마진은 단순히 'Pass/Fail'을 결정하는 경계선을 넘어, 향후 발생할 수 있는 공정 드리프트(Process Drift)를 예측하고 선제적으로 대응할 수 있는 엔지니어링 데이터를 제공합니다 [출처: pdfHBMHighBandwid20260508002.pdf].

마진의 산출 방식은 크게 절대 마진(Absolute Margin)과 상대 마진(Relative Margin, %)으로 구분됩니다.

#### [검사 마진 산출 기본 수식]

##### 1. 절대 마진 (Absolute Margin, $\Delta$ ):

$$\Delta = |\text{SpecLimit} - \text{ValueMeasured}|$$

\*여기서 SpecLimit은 상한(Upper Spec Limit, USL) 또는 하한(Lower Spec Limit, LSL)을 의미합니다.\*

##### 2. 상대 마진 (Relative Margin, %):

$$\text{Margin (\%)} = \left( \frac{|\text{SpecLimit} - \text{ValueMeasured}|}{\text{SpecNominal}} \right) \times 100$$

\*여기서 SpecNominal은 설계상의 기준값(Nominal Value)을 의미합니다.\*

예를 들어, HBM의 공급 전압(Supply Voltage, VDD) 규격이  $1.1\text{V} \pm 5\%$ 일 때, 측정값이  $1.102\text{V}$ 라면 이는 기준값 대비  $+0.18\%$ 의 마진을 확보한 상태로 판단하여 'Pass'로 분류합니다 [출처: pdfHBMHighBandwid20260508002.pdf].

#### 2. Spec 대비 마진 관리의 기술적 중요성

검사 마진은 단순한 수치 계산을 넘어, 공정의 안정성을 나타내는 공정 능력 지수(Process Capability Index, Cpk)와 밀접하게 연계됩니다. 마진이 작다는 것은 공정 변동이 발생했을 때 즉시 불량(Defect)으로 이어질 위험이 크다는 것을 의미하며, 이는 곧 고객사의 수율 저하로 직결됩니다.

| 구분                   | 마진 상태 (Margin Status) | 공정 해석 (Process Interpretation)               | 대응 전략 (Action Plan)                                                                              |
|----------------------|-----------------------|----------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|
| High Margin          | Spec 대비 여유치 충분        | 공정 능력이 매우 안정적이며, 변동에 대한 저항력이 높음              | 현재 공정 파라미터 유지 및 생산성(Throughput) 최적화                                                              |
| Low Margin           | Spec 경계에 근접           | 공정 변동 발생 시 즉시 불량 발생 위험 (Risk of Out-of-Spec) | 공정 원인 분석(Root Cause Analysis) 및 파라미터 미세 조정                                                       |
| Zero/Negative Margin | Spec 이탈 또는 경계         | 공정 능력 상실 및 불량 발생 (Fail)                      | 즉각적인 공정 중단 및 불량 원인(Bridge, Misalignment 등) 조사 [출처: 매뉴얼HBMA dvancedInspectionSyst20260509001.pdf] |

표 3.

#### 3. 공정 능력(Process Capability)과의 연계 분석

검사 마진 데이터를 누적하여 분석하면, 해당 공정이 통계적으로 얼마나 관리 가능한 상태인지를 나타내는 Cpk를 산출할 수 있습니다. 검사 장비는 단순히 개별 Lot의 Pass/Fail을 판정하는 것에 그치지 않고, 측정된 마진의 분포(Distribution)를 통해 다음과 같은 고도화된 분석을 수행해야 합니다.

- **공정 드리프트(Process Drift) 감지:** 마진의 평균값이 점진적으로 Spec 한계치로 이동하는 경향을 분석하여, 설비의 마모(Wear)나 소모품(Solder, Dispenser 등)의 교체 시기를 예측합니다 [출처: 매뉴얼HBMAdvancedInspectionSyst20260509001.pdf].

- **결함 유형별 마진 분석:** 예를 들어, TSV(Through Silicon Via)의 저항(Resistance) 마진이 감소하는 추세라면, 이는 TSV 도금 두께의 불균일성을 시사하므로 차기 공정에서 도금 두께 최적화를 권고할 수 있는 근거가 됩니다 [출처: pdfHBMHighBandwidth20260508002.pdf].

결론적으로, 크레셈의 검사 솔루션은 고정밀 광학 및 AI 비전 기술을 통해 확보된 정밀 측정값을 바탕으로, 단순한 불량 검출을 넘어 '**마진 기반의 예측적 품질 관리(Predictive Quality Control)**'를 구현함으로써 고객사의 수율 향상에 직접적으로 기여하는 것을 목표로 합니다 [출처: 분석\_크레셈CRESSEM20260509001.pdf].

## 농도비(Contrast Ratio) 및 이미지 품질

### 1. 농도비(Contrast Ratio)의 정의 및 물리적 메커니즘

반도체 미세 패턴 검사에서 결함(Defect)을 성공적으로 검출하기 위해서는 단순히 해상도(Resolution)가 높은 것을 넘어, 결함과 배경(Background) 간의 명확한 명암 차이인 농도비(Contrast Ratio)가 확보되어야 합니다. 광학 검사 시스템에서 농도비는 이미지 내의 객체가 얼마나 뚜렷하게 구분되는지를 나타내는 척도이며, 이는 검사 장비의 결함 검출력(Detectability)을 결정짓는 핵심 지표입니다.

농도비는 일반적으로 이미지의 최대 휘도( $I_{max}$ )와 최소 휘도( $I_{min}$ ) 사이의 관계를 통해 정의됩니다. 반도체 검사 환경에서의 농도비 산출식은 다음과 같습니다.

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

여기서  $I_{max}$ 는 결함 부위 또는 패턴의 밝은 영역의 강도(Intensity)를 의미하며,  $I_{min}$ 은 배경 또는 패턴의 어두운 영역의 강도를 의미합니다. 이 값이 1(또는 100%)에 가까울수록 결함이 배경으로부터 매우 뚜렷하게 분리됨을 의미하며, 0에 가까울수록 결함이 배경 노이즈에 묻혀 식별이 불가능한 상태임을 나타냅니다.

특히 HBM(High Bandwidth Memory)과 같이 적층 구조가 복잡하고 TSV(Through Silicon Via) 등 미세 전극이 밀집된 제품의 경우, 미세한 결함이 주변 패턴의 반사광이나 산란광에 의해 가려질 가능성이 매우 높습니다. 따라서 단순한 해상도 확보를 넘어, 높은 농도비를 유지할 수 있는 광학 설계가 필수적입니다.

### 2. 변조 전달 함수(MTF)와 이미지 품질의 상관관계

광학계의 성능을 평가할 때 농도비와 함께 반드시 고려해야 하는 개념이 변조 전달 함수(Modulation Transfer Function, MTF)입니다. MTF는 광학계가 물체의 공간 주파수(Spatial Frequency)를 얼마나 충실하게 이미지로 전달하는지를 나타내는 함수입니다.

이미지 센서에 도달하는 빛의 강도가 공간적으로 변화할 때, 광학계의 수차(Aberration), 회절(Diffraction), 산란(Scattering) 등으로 인해 이 변화의 폭(Modulation)은 감쇄하게 됩니다. 이때 MTF 값은 다음과 같이 표현될 수 있습니다.

$$\text{MTF}(f) = (\text{Contrast}_{\text{imaged}}(f)) / (\text{Contrast}_{\text{object}}(f))$$

여기서  $f$ 는 공간 주파수이며,  $\text{Contrast}_{\text{object}}$ 는 실제 물체가 가진 명암 차이,  $\text{Contrast}_{\text{imaged}}$ 는 렌즈와 센서를 거쳐 최종적으로 획득된 이미지의 명암 차이입니다.

반도체 패키징 검사에서 패턴의 크기가 작아질수록(즉, 공간 주파수가 높아질수록) MTF 값은 급격히 감소하는 경향을 보입니다. MTF가 낮아지면 결과적으로 이미지의 농도비(Contrast)가 저하되며, 이는 곧 결함의 가시성(Visibility) 상실로 이어집니다. 크레셈의 고정밀 검사 솔루션에서는 이러한 MTF 저하를 최소화하기 위해 고해상도 렌즈 설계와 정밀 조명 제어 기술을 결합하여 고주파 영역에서의 Contrast를 극대화하는 전략을



사용합니다.

### 3. 결함 가시성(Defect Visibility) 및 검출력 분석

결함 검출력(Detectability)은 검사 시스템이 실제 존재하는 결함을 '유의미한 신호'로 인식할 수 있는 능력을 의미합니다. 이는 앞서 언급한 농도비와 신호 대 잡음비(SNR)의 복합적인 함수로 정의됩니다.

결함이 배경 노이즈와 구별되기 위해서는 결함에 의한 신호 강도 변화( $\Delta I = I_{max} - I_{min}$ )가 시스템의 노이즈 레벨(sigmanoise)보다 충분히 커야 합니다. 이를 정량화하기 위해 검출 임계치(Detection Threshold) 개념을 도입하며, 결함 가시성 지수는 다음과 같은 관계를 가집니다.

$$\text{Visibility} \propto (\text{Contrast} \times \text{SNR}) / (f_{\text{spatial}})$$

여기서  $f_{\text{spatial}}$ 은 패턴의 공간 주파수입니다. 결함의 크기가 작아질수록(고주파 영역), 동일한 농도비를 유지하기 위해 더 높은 SNR과 더 높은 MTF가 요구됩니다.

| 분석 요소        | 결함 검출에 미치는 영향             | 개선 방안                                     |
|--------------|---------------------------|-------------------------------------------|
| Low Contrast | 결함이 배경과 유사한 밝기를 가져 식별 불가  | 조명 각도 최적화(Dark-field/Bright-field), 필터 사용 |
| Low MTF      | 패턴 경계가 흐릿해져 결함 경계 모호      | 고성능 광학 렌즈 채택, 수차 보정                       |
| High Noise   | 결함 신호가 노이즈에 묻혀 오검출/미검출 발생 | 노출 시간 최적화, AI 기반 노이즈 제거 알고리즘              |

표 4.

### 4. 차세대 패키징 검사를 위한 농도비 최적화 전략

HBM4 및 차세대 Hybrid Bonding 공정으로 진입함에 따라, 검사 대상의 종횡비(Aspect Ratio)가 높아지고 결함의 크기가  $\mu\text{m}$  단위 이하로 미세화되고 있습니다. 이러한 환경에서 농도비를 확보하기 위한 기술적 요구사항은 다음과 같습니다.

첫째, **광학적 필터링(Optical Filtering)**입니다. 특정 파장대의 빛만을 투과시키거나 산란광을 제어하는 조명 기술을 통해 배경의 반사를 억제하고 결함의 산란광만을 선택적으로 증폭시켜  $I_{max}$ 와  $I_{min}$ 의 차이를 극대화해야 합니다.

둘째, **AI 기반의 이미지 복원(Image Restoration)**입니다. 물리적인 광학계의 한계로 인해 발생하는 MTF 저하를 극복하기 위해, 딥러닝 알고리즘을 활용하여 저대역 통과 필터(Low-pass filter) 효과가 나타난 이미지를 고해상도로 복원하고 Contrast를 인위적으로 향상시키는 기술이 도입되고 있습니다. 이는 크레셈의 AI 비전 솔루션이 지향하는 방향 중 하나로, 단순 Rule-based 검사를 넘어 과검(Over-kill)을 줄이고 미검(Under-kill)을 방지하는 핵심 동력입니다.

셋째, **다중 파장 및 다중 각도 조명(Multi-wavelength & Multi-angle Illumination)**입니다. 단일 조건에서는 농도비가 낮은 결함이라도, 조명의 입사각이나 파장을 변경했을 때 명암 차이가 극명해지는 특성을 이용합니다. 이를 통해 3D 구조를 가진 HBM의 복잡한 표면에서도 높은 결함 가시성을 확보할 수 있습니다.



그림 2.

## 신호 대 잡음비(SNR) 및 노이즈 제어

반도체 패키징 검사, 특히 HBM(High Bandwidth Memory)이나 FC-BGA(Flip Chip Ball Grid Array)와 같이 미세 패턴이 고밀도로 집적된 대상을 검사할 때, 이미지의 질적 신뢰도를 결정짓는 가장 핵심적인 물리량은 신호 대 잡음비(Signal-to-Noise Ratio, SNR)입니다. 검사 시스템이 포착하고자 하는 유효한 신호(Signal)가 배경 노이즈(Noise)에 의해 가려지게 되면, 결함(Defect)과 정상 패턴을 구분하는 검출력(Detectability)이 급격히 저하되며, 이는 곧 과검(Over-kill) 또는 미검(Under-kill)으로 이어져 고객사의 수율(Yield)에 직접적인 타격을 줍니다 [출처: 분석\_크레셈CRESSEM20260509001.pdf].

### 1. SNR의 정의 및 수학적 모델링

SNR은 측정된 신호의 세기와 배경 노이즈의 세기 사이의 상대적인 비율을 의미하며, 일반적으로 데시벨(decibel, dB) 단위를 사용하여 로그 스케일로 표현합니다. 광학 검사 시스템에서 SNR은 이미지 센서(CMOS/CCD)에 도달하는 광자(Photon)의 양과 시스템 내부 및 외부에서 발생하는 불필요한 신호의 비율로 정의됩니다.

#### [SNR 산출 수식]

##### 1. 전력 기반 SNR (Power Ratio):

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

##### 2. 전압/진폭 기반 SNR (Amplitude Ratio):

$$SNR_{amplitude} = (A_{signal}) / (A_{noise})$$

##### 3. 데시벨(dB) 변환식:

$$SNR(dB) = 10 \cdot \log_{10} \left( \frac{P_{signal}}{P_{noise}} \right) = 20 \cdot \log_{10} \left( \frac{A_{signal}}{A_{noise}} \right)$$

여기서  $P_{signal}$ 은 검사 대상(예: Bump, TSV, Micro Bump)으로부터 반사되어 센서에 도달하는 유효 광신호의 전력을 의미하며,  $P_{noise}$ 는 센서 자체의 열 잡음(Thermal Noise), 판독 잡음(Readout Noise), 그리고 조명 불균일성이나 주변 광에 의한 노이즈를 모두 포함합니다.

### 2. 광학 검사 시스템에서의 주요 노이즈 원인 분석

고정밀 검사 환경에서 SNR을 저하시키는 노이즈 요인은 크게 광학적 요인, 센서 물리적 요인, 그리고 환경적 요인으로 분류할 수 있습니다.

| 구분     | 노이즈 유형 (Noise Type)         | 상세 설명 및 발생 기전                                           | SNR에 미치는 영향         |
|--------|-----------------------------|---------------------------------------------------------|---------------------|
| 광학적 요인 | Shot Noise (광자 잡음)          | 빛의 입자성(Quantization)에 의해 발생하는 통계적 변동성. 광량의 제곱근에 비례함.    | 광량이 적을수록 상대적 영향력 증가 |
|        | Illumination Non-uniformity | 조명 시스템의 광량 분포가 불균일하여 발생하는 배경 노이즈.                       | 배경 대비 신호 강도 저하      |
| 센서 요인  | Readout Noise (판독 잡음)       | 센서의 ADC(Analog-to-Digital Converter) 과정에서 발생하는 전기적 노이즈. | 저조도 환경에서 결정적 요인     |

|        |                             |                                         |                         |
|--------|-----------------------------|-----------------------------------------|-------------------------|
|        | Dark Current Noise (암전류 잡음) | 빛이 없는 상태에서도 열 에너지에 의해 생성되는 전하. 온도에 민감함. | 고온 동작 시 SNR 급감          |
| 환경적 요인 | Ambient Light (주변광)         | 검사 챔버 내부로 유입되는 외부 광원.                   | 배경 신호(Background) 레벨 상승 |

표 5.

특히, HBM 검사와 같이 고온 환경에서 동작하거나 정밀한 광학 엔진을 사용하는 경우, 센서의 온도 상승에 따른 **암전류(Dark Current)** 증가와 **열 잡음(Thermal Noise)**은 신호의 선명도를 흐리는 치명적인 요소가 됩니다 [출처: 매뉴얼HBMAAdvancedInspectionSyst20260509001.pdf].

### 3. SNR 기반의 결함 검출 한계 (Detectability Limit)

검사 장비의 성능을 평가할 때, 단순히 해상도(Resolution)가 높다고 해서 결함을 잘 찾는 것은 아닙니다. 해상도가 물리적으로 결함의 크기를 구현할 수 있더라도, SNR이 낮으면 결함이 노이즈 속에 묻혀버리는 'Masking Effect'가 발생합니다.

결함 검출의 신뢰도를 확보하기 위한 최소 SNR 조건은 다음과 같은 관계를 가집니다.

#### [결함 검출 가능 조건]

$$\text{Contrast}(C) \times \text{SNR} > \text{Threshold}(T)$$

여기서 C는 결함과 배경 간의 농도비(Contrast Ratio)이며, T는 검사 알고리즘(AI 비전 또는 Rule-based)이 결함으로 판단하기 위한 임계값입니다. 즉, 미세한 결함(낮은 C)을 검출하기 위해서는 시스템의 SNR을 극대화하여 유효 신호의 변동폭을 노이즈보다 훨씬 크게 확보해야 합니다. 이는 크레셈의 AI 비전 솔루션이 단순한 Rule-based 방식을 넘어, 딥러닝(Deep Learning)을 통해 노이즈와 결함을 분리하는 기술을 고도화하는 핵심 이유이기도 합니다 [출처: 분석\_크레셈CRESSEM20260509001.pdf].

### 4. SNR 개선을 위한 공학적 제어 방안

검사 장비의 설계 단계 및 운용 단계에서 SNR을 극대화하기 위한 전략은 다음과 같습니다.

#### 4.1. 광학적 최적화 (Optical Optimization)

- **조명 제어 (Lighting Control):** 고해상도 카메라와 정밀 조명 제어 기술을 결합하여, 검사 대상의 반사율(Reflectivity)에 최적화된 조명 각도와 밝기를 제공함으로써 신호 강도(Psignal)를 높입니다. 이는 Tact Time을 유지하면서도 높은 SNR을 확보하는 핵심 기술입니다 [출처: 분석\_크레셈CRESSEM20260509001.pdf].
- **대역 통과 필터 (Band-pass Filter) 활용:** 특정 파장대의 조명만을 투과시키고 주변광 및 불필요한 파장대를 차단하여 배경 노이즈를 억제합니다.

#### 4.2. 센서 및 전자적 제어 (Sensor & Electronic Control)

- **노출 시간(Exposure Time) 및 이득(Gain) 조절:** 노출 시간을 늘려 광자 수를 확보하여 Shot Noise의 상대적 비중을 낮추거나, Gain을 조절하여 신호를 증폭합니다. 단, Gain 증폭 시 Readout Noise도 함께 증폭되므로 최적의 Trade-off 지점을 찾는 것이 중요합니다.
- **냉각 시스템 (Cooling System):** 센서의 온도를 일정하게 유지하여 암전류(Dark Current)에 의한 노이즈 발생을 원천적으로 차단합니다.

#### 4.3. 디지털 신호 처리 (Digital Signal Processing, DSP)

- **AI 기반 Noise Reduction:** 크레셈의 핵심 기술인 Deep Learning 기반 알고리즘을 적용하여, 이미지 내의 무작위 노이즈(Random Noise) 패턴을 학습하고 이를 제거하면서도 결함의 에지(Edge) 성분은 보존하는 지능형 필터링을 수행합니다 [출처: 분석\_크레셈CRESSEM20260509001.pdf].
- **평균화 기법 (Averaging):** 동일한 위치에 대해 다수의 프레임을 획득한 후 평균을 내어 무작위 노이즈를 상쇄시키는 방식을 사용합니다.

## 5. 결론: 검사 신뢰도 확보를 위한 통합적 관점

결론적으로, SNR은 광학계의 해상도, 센서의 성능, 그리고 조명 및 제어 알고리즘이 유기적으로 결합되어 결정되는 종합 지표입니다. HBM4와 같은 차세대 공정에서 도입될 Hybrid Bonding 기술은 더욱 미세한 접합부 검사를 요구하므로, 단순한 광학 배율 증가보다는 **"고신호-저잡음(High Signal, Low Noise)"** 환경을 구현하기 위한 SNR 제어 기술이 검사 장비의 핵심 경쟁력이 될 것입니다. 크레셈은 이러한 물리적 한계를 극복하기 위해 하드웨어의 정밀 제어와 AI 기반의 소프트웨어 솔루션을 통합하여 고객사의 수율 향상에 기여하고 있습니다 [출처: 분석\_크레셈CRESSEM20260509001.pdf].

## 종합 성능 상관관계 분석

반도체 검사 장비의 성능은 개별 광학 파라미터의 단순 합이 아닌, 해상도(Resolution), 신호 대 잡음비(SNR), 그리고 농도비(Contrast Ratio)가 유기적으로 결합되어 결정되는 통합 시스템의 결과물입니다. 특히 HBM(High Bandwidth Memory) 및 FC-BGA(Flip Chip Ball Grid Array)와 같은 고밀도 패키징 검사에서는 미세한 결함(Defect)을 놓치지 않으면서도 과검(Over-kill)을 방지하는 것이 핵심이며, 이를 위해 각 지표 간의 상관관계(Correlation)를 이해하고 최적화(Optimization)하는 과정이 필수적입니다.

### 1. 검출 성능의 통합 메커니즘: 해상도와 SNR의 결합

광학 검사 시스템에서 '결함을 볼 수 있는가'의 문제는 단순히 해상도가 높다고 해결되지 않습니다. 레일리 한계(Rayleigh Criterion)에 의해 결정되는 이론적 해상도(R)가 아무리 작더라도, 해당 패턴에서 발생하는 신호(Signal)가 노이즈(Noise) 레벨에 묻혀버린다면 검출은 불가능합니다.

- **해상도와 SNR의 상충 관계 (Trade-off):** 해상도를 높이기 위해 개구수(NA, Numerical Aperture)를 키우거나 파장( $\lambda$ )을 줄이면, 렌즈를 통해 들어오는 광량이 감소하여 SNR이 저하되는 경향이 있습니다. 이는 곧 이미지의 입자감(Graininess)을 증가시켜 미세 패턴의 경계선을 불분명하게 만듭니다.
- **검출 임계치(Detection Threshold):** 최종적인 결함 검출력은 해상도에 의한 '공간적 분해능'과 SNR에 의한 '신호 식별력'의 곱으로 결정됩니다. 즉,  $\text{Detectability} \propto (\text{Contrast} \times \text{SNR}) / (\text{Resolution})$ 의 관계를 형성하며, 시스템 설계 시 이들 사이의 최적 접점을 찾는 것이 수율(Yield) 관리의 핵심입니다.

### 2. 농도비(Contrast)를 통한 결함 가시성 확보

농도비(Contrast Ratio)는 결함(Defect)과 배경(Background) 사이의 명암 차이를 수치화한 것으로, 검사 알고리즘이 결함을 판단하는 직접적인 근거가 됩니다.

- **SNR과 Contrast의 시너지:** 높은 농도비를 확보하더라도 SNR이 낮으면, 노이즈가 결함의 신호와 유사한 패턴을 형성하여 과검(Over-kill)을 유발합니다. 반대로 SNR이 매우 높더라도 농도비가 낮으면 결함이 배경에 묻혀 미검(Under-kill)이 발생합니다.
- **수율(Yield) 최적화 관점:** 크레셈의 AI 비전 솔루션은 이러한 상관관계를 활용하여, 단순 Rule-based 검사의 한계를 극복합니다. AI 알고리즘은 높은 SNR 환경에서 확보된 농도비 데이터를 학습하여, 미세 결함과 정상적인 노이즈를 통계적으로 구분함으로써 과검률을 획기적으로 낮추고 공정 수율을 극대화합니다 [출처: 분석\_크레셈CRESSEM20260509001.pdf].

### 3. 통합 성능 지표와 검사 수율(Yield)의 상관관계 모델

검사 시스템의 최종 목적은 '정확한 불량 판정'을 통한 고객사의 수율 향상입니다. 이를 위한 통합 메커니즘은 다음과 같은 논리 구조를 가집니다.

| 핵심 지표                 | 물리적 역할       | 수율에 미치는 영향        | 최적화 전략                 |
|-----------------------|--------------|-------------------|------------------------|
| 해상도 (Resolution)      | 패턴의 최소 크기 결정 | 미검(Under-kill) 방지 | 고NA 렌즈 및 고해상도 센서 채택    |
| SNR (Signal-to-Noise) | 신호의 순도 결정    | 과검(Over-kill) 방지  | 광량 제어 및 고감도 CMOS 센서 활용 |
| 농도비 (Contrast)        | 결함의 명확성 결정   | 판정 정확도 향상         | 조명 최적화 및 필터링 기술 적용     |

표 6.

결론적으로, 차세대 HBM4 및 Hybrid Bonding 공정 대응을 위해서는 초미세 간극을 측정할 수 있는 고해상도 광학계와 더불어, 극도로 낮은 신호에서도 결함을 분리해낼 수 있는 고성능 SNR 제어 기술이 통합되어야 합니다 [출처: 분석\_크레셈CRESSEM20260509001.pdf]. 이러한 통합적 접근만이 고객사의 공정 불량 원인을 역추적(Root Cause Analysis)하고 수율을 안정화하는 스마트 팩토리 솔루션의 기반이 됩니다 [출처: 분석\_크레셈CRESSEM20260509001.pdf].

### 검사 성능 지표 통합 메커니즘 및 수율 최적화 흐름도

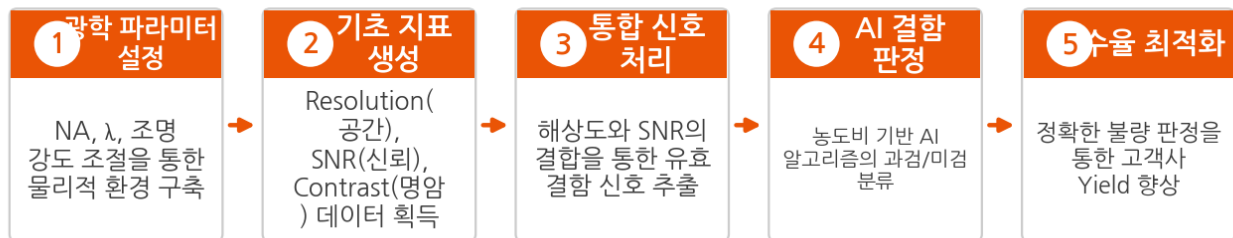


그림 3.

### 결론/시사점

본 보고서에서는 반도체 미세 패턴 검사의 핵심인 광학 해상도(Resolution), 화소 면적(Pixel Area), 검사 마진(Inspection Margin), 농도비(Contrast Ratio), 그리고 신호 대 잡음비(SNR)에 이르는 주요 성능 지표(KPI)를 수식 모델을 통해 심층 분석하였습니다. 분석 결과, 차세대 HBM(High Bandwidth Memory) 및 FC-BGA(Flip Chip Ball Grid Array) 검사 장비의 설계 경쟁력은 개별 지표의 단순 최적화가 아닌, 각 파라미터 간의 복합적인 상관관계를 제어하는 통합 설계 역량에 달려 있음을 확인하였습니다.

#### 1. 차세대 패키징 검사 장비를 위한 설계 가이드 (Design Guide)

HBM4 및 차세대 2.5D/3D 적층 공정으로 진입함에 따라, 기존의 Bump 방식보다 훨씬 높은 정밀도의 검사가 요구되고 있습니다 [출처: 분석\_크레셈CRESSEM20260509001.pdf]. 이를 충족하기 위한 최적의 광학 파라미터

설계 방향을 다음과 같이 제안합니다.

- **초미세 간극(Gap) 측정을 위한 고해상도 확보:** Hybrid Bonding 기술 도입에 대응하기 위해, 레일리 한계(Rayleigh Criterion)를 극복할 수 있는 고개구수(High NA) 광학계와 단파장 광원(Short Wavelength)의 조합이 필수적입니다. 이는 미세한 결함(Defect)을 식별하기 위한 물리적 한계를 결정짓는 핵심 요소입니다.
- **이미지 신뢰도(SNR) 및 검출력(Detectability)의 균형:** 해상도를 높이기 위해 NA를 증가시킬 경우 광량 확보가 어려워져 SNR이 저하될 위험이 있습니다. 따라서 고속 검사 환경에서도 과검(Over-kill)을 방지할 수 있도록, AI 기반의 결함 분류 알고리즘과 결합된 최적의 노출 시간 및 조명 제어(Lighting Control) 전략이 병행되어야 합니다 [출처: 분석\_크레셈CRESSEM20260509001.pdf].
- **공정 마진(Margin) 중심의 검사 프로세스 구축:** 단순히 Pass/Fail을 판정하는 것을 넘어, 설계 규격(Spec) 대비 측정값의 여유치(Margin)를 수치화하여 관리함으로써 공정의 안정성을 선제적으로 예측해야 합니다 [출처: pdfHBMHighBandwidth20260508001.pdf].

## 2. 미래 로드맵 및 전략적 시사점 (Future Roadmap)

크레셈은 현재의 광학 검사 기술을 넘어, 초미세 간극을 측정할 수 있는 차세대 검사 모듈 개발에 집중함으로써 시장 주도권을 확보할 전략을 수립하고 있습니다 [출처: 분석\_크레셈CRESSEM20260509001.pdf].

- **AI 통합형 스마트 검사 솔루션:** 단순한 Rule-based 검사의 한계를 극복하기 위해, Deep Learning 기반의 결함 분류 기술을 하드웨어와 결합하여 미세 결함과 정상 노이즈를 명확히 구분함으로써 수율(Yield) 향상에 직접적으로 기여하는 파트너로 진화해야 합니다 [출처: 분석\_크레셈CRESSEM20260509001.pdf].
- **고객 맞춤형(Customized) 시스템 제공:** 반도체 제조사별로 상이한 적층 방식과 공정 특성을 고려하여, 고객사의 공정 프로세스에 최적화된 맞춤형 검사 시스템을 제공함으로써 기술적 락인(Lock-in) 효과를 강화해야 합니다 [출처: 분석\_크레셈CRESSEM20260509001.pdf].

결론적으로, 차세대 반도체 검사 시장에서의 승패는 '물리적 해상도 한계의 극복'과 'AI를 통한 데이터 분석 기반의 수율 최적화'를 얼마나 유기적으로 결합하느냐에 달려 있습니다. 본 보고서에서 제시한 KPI 수식 모델은 향후 장비 개발 및 성능 검증의 표준 가이드라인으로 활용될 것입니다.