

AFVI 다중 검사 알고리즘 기반 검사 성능 한도 및 기술 비교 분석 보고서

문서번호 CRSM-AI-2026-AUTO

작성일 2026-07-21

작성 Cressem AI 시스템 (자동 생성)

보안등급 사내 비밀 (Confidential)

버전 v1.0

목 차

AFVI 다중 검사 알고리즘 기반 검사 성능 한도 및 기술 비교 분석 보고서	3
개요 및 배경	3
AFVI 검사 한도(Inspection Limit)의 정의 및 결정 요인	4
크레셈(CRESSEM)의 병렬 다중 검사(Parallel Multi-Inspection) 아키텍처	5
AI 기반 결함 분류를 통한 과검(Over-kill) 최적화 기술	8
경쟁사 기술 비교 분석 (ATI, GigaVis, Trivis, SCREEN)	10
검사 성능 및 공정 효율성(Throughput) 기대 효과	12
결론 및 기술적 시사점	13
참고 자료	14

AFVI 다중 검사 알고리즘 기반 검사 성능 한도 및 기술 비교 분석 보고서

본 보고서는 메모리 PCB 제조 공정용 AFVI 장비의 핵심인 다중 검사 알고리즘(Multi-Inspection Algorithms)을 분석합니다. 크레셈의 Rule-base 및 AI 병렬 검사 기술을 중심으로 경쟁사 대비 검사 한도(Inspection Limit)와 과검률(Over-kill) 개선 효과를 심도 있게 비교합니다.

개요 및 배경

1.1. 고밀도 PCB 제조 공정의 패러다임 변화와 검사의 중요성

최근 반도체 패키징 기술이 고도화됨에 따라, 이를 지지하는 인쇄 회로 기판(PCB, Printed Circuit Board)의 사양 또한 급격한 변화를 맞이하고 있습니다. 특히 AI 가속기, 고성능 컴퓨팅(HPC), 5G 통신 장비의 확산은 기판의 미세화(Miniaturization)와 고집적화(High-density)를 가속화하였으며, 이는 곧 FC-BGA(Flip Chip Ball Grid Array) 및 High-Density Interconnect(HDI) 기판과 같은 차세대 고부가가치 제품의 수요 폭증으로 이어지고 있습니다.

이러한 고밀도 기판 제조 공정에서는 회로의 선폭(Line Width)과 간격(Space)이 극도로 좁아지며, 적층 구조(Stack-up)가 복잡해짐에 따라 미세한 결함 하나가 제품 전체의 신뢰성을 무너뜨리는 치명적인 결과를 초래할 수 있습니다. 과거의 범용 PCB 공정에서는 육안 검사나 단순한 Rule-base 기반의 검사로도 일정 수준의 품질 관리가 가능했으나, 현재의 초미세 공정에서는 인간의 시각적 한계를 넘어선 정밀도와 초고속 스캔 능력을 갖춘 AFVI(Automatic Final Visual Inspection, 자동 최종 외관 검사) 시스템의 역할이 필수적입니다.

1.2. AFVI(Automatic Final Visual Inspection)의 역할 및 기술적 요구사항

AFVI는 PCB 제조의 최종 단계에서 제품의 외관 및 전기적 연결성을 보장하기 위한 물리적/광학적 검사를 수행하는 핵심 공정입니다. 단순히 결함의 유무를 판단하는 것을 넘어, 제품이 설계된 사양(Specification)을 충족하는지, 그리고 후속 공정(예: SMT, Assembly)에서 불량률 유발 요소가 없는지를 종합적으로 판정합니다.

현대적인 AFVI 시스템이 갖추어야 할 핵심 기술적 요구사항은 다음과 같습니다.

- **초고해상도 광학 검출(High-Resolution Optical Detection):** 수 μm 단위의 미세 회로 패턴, 미세한 변색(Discoloration), 그리고 아주 작은 SR(Solder Resist) 긁힘(Scratch)을 식별할 수 있는 고해상도 이미지 획득 능력이 요구됩니다.
- **복합 결함 식별 능력:** 기판의 표면 오염, 패턴의 정렬 불량(Misalignment), 금속 도금의 불균일성 등 단일 알고리즘으로 해결하기 어려운 복합적인 결함들을 동시에 포착해야 합니다.
- **높은 생산성(High Throughput):** 미세화된 공정일수록 검사해야 할 데이터의 양이 기하급수적으로 증가하므로, 검사 정밀도를 유지하면서도 생산 라인의 Tact Time(생산 주기)을 저해하지 않는 고속 검사 기술이 필수적입니다.

1.3. 단일 검사 방식의 한계와 다중 검사(Multi-Inspection)의 필요성

기존의 많은 검사 장비들은 특정 결함에 특화된 단일 알고리즘(Single Algorithm)을 사용해 왔습니다. 예를 들어, 패턴 매칭(Pattern Matching) 기술은 회로의 단선이나 단락을 찾는 데는 탁월하지만, 기판 표면의 미세한 색상 변화나 화학적 변색을 감지하는 데는 한계가 있습니다. 반대로 색상 기반 검사는 오염물질은 잘 찾아내지만, 회로의 기하학적 구조 결함을 판단하기에는 부적합합니다.

이러한 단일 방식의 한계는 다음과 같은 공정상의 문제점을 야기합니다.

1. **검사 사각지대(Inspection Blind Spot) 발생:** 특정 알고리즘이 잡지 못하는 결함이 그대로 통과되어 고객사로 유출(Defect Leakage)될 위험이 존재합니다.

2. **과검(Over-kill) 문제:** 미세한 노이즈(Noise)나 정상적인 공정 산물을 결함으로 오인하여 불량으로 판정함으로써, 실제 양품을 폐기하게 만들어 수율(Yield)을 저하시킵니다.

3. **공정 효율 저하:** 결함 유형별로 별도의 검사 장비를 운용할 경우, 설비 투자비(CAPEX)가 증가하고 공정 간 이동 시간이 늘어나 전체적인 생산성이 떨어집니다.

따라서, 현대의 고밀도 PCB 제조 환경에서는 **다중 검사(Multi-Inspection)** 아키텍처가 필수적입니다. 이는 변색, SR, 패턴 매칭 등 서로 다른 특성을 가진 알고리즘들을 하나의 시스템 내에서 병렬로 통합 운영함으로써, 검사 사각지대를 제거하고 과검률을 획기적으로 낮추는 전략입니다. 본 보고서에서는 이러한 다중 검사 알고리즘이 어떻게 검사 성능 한도를 확장하고, 크레셈(CRESSEM)의 기술력이 어떻게 차세대 기판 시장의 수율 최적화를 견인하는지를 심도 있게 분석하고자 합니다.

AFVI 검사 한도(Inspection Limit)의 정의 및 결정 요인

AFVI(Automatic Fine Visual Inspection, 자동 미세 외관 검사) 공정에서 **검사 한도(Inspection Limit)**란, 장비가 물리적·알고리즘적으로 결함(Defect)을 유의미하게 식별하고 판정할 수 있는 최저 임계치를 의미합니다. 이는 단순히 '작은 것을 보는 능력'을 넘어, 검사 대상인 기판(Substrate)의 미세 피치(Fine Pitch)와 결함의 물리적 크기, 그리고 검사 알고리즘의 신뢰도가 결합되어 결정되는 복합적인 성능 지표입니다. 고밀도 PCB 및 차세대 패키징 기판(FC-BGA 등)으로 공정이 전환됨에 따라, 검사 한도를 결정짓는 요소들은 더욱 정밀한 상관관계를 형성하고 있습니다.

검사 한도를 결정하는 핵심 요인은 크게 **광학계 성능(Optical Engine)**, **해상도(Resolution)**, 그리고 **알고리즘의 판정 능력(Algorithmic Capability)**의 세 가지 축으로 구분할 수 있습니다.

1. 광학계 성능(Optical Engine)과 물리적 한계

검사 한도의 가장 기초적인 물리적 토대는 **광학 엔진(Optical Engine)**의 성능입니다. 광학계는 검사 대상으로부터 반사된 빛을 수집하여 이미지 센서에 전달하는 역할을 하며, 여기서 발생하는 물리적 제약은 검사 한도를 직접적으로 규정합니다.

- **조명 시스템(Lighting System)의 균일도 및 분광 특성:** 변색(Discoloration)이나 SR(Solder Resist)의 미세한 균형을 검출하기 위해서는 매우 높은 대비(Contrast)가 필요합니다. 조명이 불균일하거나 특정 파장대에서 산란(Scattering)이 심할 경우, 실제 결함이 아닌 광학적 노이즈가 발생하여 검사 한도를 저하시킵니다.
- **수치 구경(Numerical Aperture, NA) 및 초점 심도(Depth of Field, DOF):** 3D 검사나 Bump 높이 측정 시, 렌즈의 NA가 높을수록 더 높은 해상도를 얻을 수 있으나 초점 심도가 얕아지는 트레이드오프(Trade-off) 관계가 존재합니다. 기판의 굴곡(Warpage)이나 Bump의 높이 차이가 큰 경우, 초점 심도의 한계는 특정 영역의 검사 한도를 급격히 떨어뜨리는 요인이 됩니다.
- **센서의 양자 효율(Quantum Efficiency) 및 노이즈(Noise):** 센서 자체의 암전류(Dark Current)나 판독 노이즈(Readout Noise)는 미세한 결함 신호를 묻히게 만듭니다. 이는 특히 저조도 환경이나 고속 스캔 시 검사 한도를 결정짓는 결정적 변수가 됩니다.

2. 해상도(Resolution)와 공간 주파수(Spatial Frequency)

검사 한도는 장비가 구현할 수 있는 **공간 해상도(Spatial Resolution)**에 의해 이론적 상한선이 결정됩니다. 이는 픽셀(Pixel) 크기와 광학적 분해능의 조합으로 정의됩니다.

구분	상세 내용	검사 한도에 미치는 영향
----	-------	---------------

픽셀 해상도 (Pixel Resolution)	단위 면적당 할당되는 픽셀의 수 ($\mu\text{m}/\text{pixel}$)	픽셀 크기가 작을수록 미세 패턴(Pattern)의 Edge를 정밀하게 표현할 수 있어 검사 한도가 상승함.
광학 분해능 (Optical Resolution)	렌즈가 구분할 수 있는 최소 두 점 사이의 거리	광학적 분해능이 낮으면, 아무리 고해상도 센서를 사용하더라도 두 결함이 하나로 뭉쳐 보이는 'Merging' 현상이 발생함.
샘플링 이론 (Nyquist Theorem)	신호 복원을 위한 최소 샘플링 주파수	검사하고자 하는 결함의 주파수 성분이 샘플링 주파수의 절반을 넘을 경우, 에일리어싱(Aliasing)에 의한 허위 결함이 발생함.

표 1. 해상도(Resolution)와 공간 주파수(Spatial Frequency)

일반적으로 검사 대상 결함의 크기가 장비의 해상도보다 최소 3~5배 이상 커야 신뢰성 있는 검출이 가능하다고 판단하며, 이를 '**검출 가능한 최소 결함 크기(Minimum Detectable Defect Size)**'라고 부릅니다.

3. 알고리즘의 판정 능력과 신뢰성(Reliability)

광학계와 해상도가 '결함을 볼 수 있는가'의 문제라면, **알고리즘(Algorithm)**은 '본 것을 결함으로 확정할 수 있는가'의 문제입니다. 검사 한도는 알고리즘의 수학적 모델링과 데이터 처리 방식에 의해 최종적으로 완성됩니다.

- **신호 대 잡음비(Signal-to-Noise Ratio, SNR) 최적화:** 알고리즘은 광학적 노이즈와 실제 결함 신호를 분리해야 합니다. Rule-base 알고리즘은 임계값(Threshold) 설정에 따라 검사 한도가 결정되는데, 임계값이 너무 낮으면 과검(Over-kill)이 발생하고, 너무 높으면 미검(Under-kill)이 발생합니다.
- **패턴 매칭 및 특징 추출(Feature Extraction):** 설계 데이터(CAD)와 실제 이미지 간의 상관관계(Correlation)를 계산할 때, 미세한 정렬 불량(Misalignment)이나 패턴의 미세 변형을 잡아내는 능력은 알고리즘의 복잡도와 연관됩니다.
- **AI 기반의 지능형 한도 확장:** 최근에는 Deep Learning을 통해 단순한 픽셀 값의 차이를 넘어, 결함의 형태학적(Morphological) 특성을 학습합니다. 이는 기존 Rule-base 방식으로는 구분하기 어려웠던 '노이즈와 미세 결함 사이의 경계 영역'을 효과적으로 판정함으로써, 물리적 해상도의 한계를 알고리즘적으로 극복하고 실질적인 검사 한도를 높이는 핵심 기술로 작용합니다.

결론적으로, AFVI의 검사 한도는 광학계가 제공하는 물리적 정보량(Information Capacity)과 알고리즘이 이를 해석하는 정밀도(Interpretation Precision)의 곱으로 정의됩니다. 따라서 차세대 고밀도 기판 대응을 위해서는 고해상도 광학 엔진의 도입과 더불어, 미세 결함의 특징을 정확히 분류할 수 있는 지능형 알고리즘의 통합이 필수적입니다.

크레셈(CRESSEM)의 병렬 다중 검사(Parallel Multi-Inspection) 아키텍처

고밀도 패키징 기판(High-Density Substrate) 및 FC-BGA 제조 공정이 미세화됨에 따라, 기존의 단일 알고리즘 기반 검사 방식은 검사 정밀도와 생산성 사이의 트레이드오프(Trade-off) 문제를 극복하기 어려운 한계에 직면해 있습니다. 크레셈(CRESSEM)은 이러한 기술적 난제를 해결하기 위해 **Rule-base 정밀 검사**와 **AI-Driven 지능형 분류**가 유기적으로 결합된 독자적인 **병렬 다중 검사(Parallel Multi-Inspection) 아키텍처**를 구축하였습니다. 본 섹션에서는 크레셈의 아키텍처가 어떻게 검사 한도를 극대화하고 과검(Over-kill)을 최소화하는지 그 구조적 원리를 상세히 분석합니다.

1. 병렬 검사 프로세스의 구조적 메커니즘

크레셈의 AFVI(Automatic Fine Visual Inspection) 시스템은 데이터 획득(Data Acquisition) 단계 이후, 검사 엔진이 단일 경로로 동작하는 기존 방식과 달리, 수집된 고해상도 이미지를 다수의 독립적인 검사 모듈로 동시 분산시키는 **병렬 처리(Parallel Processing)** 구조를 채택하고 있습니다.

이 아키텍처의 핵심은 '**Rule-base 엔진**'과 '**AI 엔진**'의 역할 분담 및 동시 가동에 있습니다.

첫째, **Rule-base 검사 모듈**은 설계 데이터(CAD Data) 또는 골든 이미지(Golden Image)를 기준으로 물리적 수치와 기하학적 형상을 정밀하게 비교합니다. 이 모듈은 패턴 매칭(Pattern Matching)을 통해 회로의 단선(Open), 단락(Short), 정렬 불량(Misalignment)을 검출하며, SR(Solder Resist)의 도포 상태나 변색(Discoloration)과 같은 물리적 특성을 규격(Spec)에 따라 엄격하게 판정합니다. 이는 검사의 '**신뢰성(Reliability)**'과 '**재현성(Repeatability)**'을 담보하는 기반이 됩니다.

둘째, **AI-Driven 검사 모듈**은 Rule-base 모듈이 검출한 후보 결함(Defect Candidates)을 실시간으로 분석합니다. Rule-base 방식은 미세한 노이즈(Noise), 조명 불균일, 혹은 기판 표면의 미세한 질감 차이를 결함으로 오인하여 불필요한 불량 판정을 내리는 '**과검(Over-kill)**' 문제가 발생하기 쉽습니다. 크레셈의 AI 엔진은 Deep Learning 알고리즘을 활용하여, 검출된 객체가 실제 공정 불량(Real Defect)인지 아니면 단순한 광학적 노이즈(Optical Noise)인지를 고차원적인 특징 추출(Feature Extraction)을 통해 판별합니다. [2, 7]

2. 데이터 흐름 및 통합 판정 로직

크레셈의 병렬 아키텍처 내에서 데이터는 다음과 같은 고속 파이프라인을 통해 흐릅니다.

1. **고속 광학 스캐닝(High-Speed Optical Scanning)**: 고해상도 카메라와 정밀 조명 제어 기술이 결합된 광학 엔진이 기판 표면을 스캔하여 대용량의 RAW 이미지를 생성합니다. 이때 생산 라인의 Tact Time(생산 주기)을 극대화하기 위해 초고속 데이터 전송 기술이 적용됩니다. [2]

2. **병렬 알고리즘 분산(Algorithmic Distribution)**: 생성된 이미지는 즉시 Rule-base 엔진(패턴/SR/변색 검사)과 AI 엔진(결함 분류)으로 동시에 전달됩니다. 이 과정에서 데이터 병목 현상을 방지하기 위해 하드웨어 가속 기술이 사용됩니다.

3. 교차 검증 및 최종 판정(Cross-Validation & Final Decision):

- Rule-base 모듈이 결함을 '**검출(Detection)**'하면, 해당 영역의 좌표와 특성 데이터가 AI 모듈로 전달됩니다.
- AI 모듈은 해당 영역을 집중 분석하여 결함의 유형(Type)을 분류하고, 과검 여부를 확정합니다.
- 최종적으로 '**검출된 결함의 물리적 수치(Rule-base)**' + '**결함의 지능적 분류(AI)**'가 결합된 통합 리포트가 생성됩니다.

이러한 구조는 단순히 두 기술을 합친 것이 아니라, Rule-base의 높은 검출력(Sensitivity)을 AI의 높은 선택성(Selectivity)으로 보완함으로써, 검사 한도를 넓히면서도 과검률을 획기적으로 낮추는 시너지를 창출합니다. [7]

3. 아키텍처의 기술적 이점: 수율과 생산성의 동시 확보

크레셈의 병렬 다중 검사 아키텍처는 고객사의 생산 라인에 두 가지 핵심적인 가치를 제공합니다.

첫째, **실질 수율(Net Yield)의 향상**입니다.

기존 검사 장비에서 과검(Over-kill)이 발생하면, 정상 제품이 불량으로 분류되어 폐기되거나 불필요한 재검사(Re-inspection) 공정을 유발합니다. 이는 곧 제조 원가 상승으로 이어집니다. 크레셈의 AI 통합 솔루션은 미세 결함과 노이즈를 명확히 구분함으로써 과검을 최소화하고, 고객사가 실제 공정에서 확보할 수 있는 '**진짜 수율**'을 극대화합니다. [7]

둘째, 공정 효율성(Throughput)의 극대화입니다.

검사 항목이 늘어날수록 검사 시간은 선형적으로 증가하는 것이 일반적입니다. 그러나 크레셈의 병렬 처리 구조는 각 알고리즘이 독립적인 연산 자원을 사용하여 동시에 수행되므로, 변색, SR, 패턴 매칭 등 다중 검사 항목을 추가하더라도 전체 Tact Time의 증가를 최소화할 수 있습니다. 이는 고속 양산 라인에서 장비의 생산성을 결정짓는 핵심 요소입니다. [2]

크레셈 병렬 다중 검사 아키텍처 구성

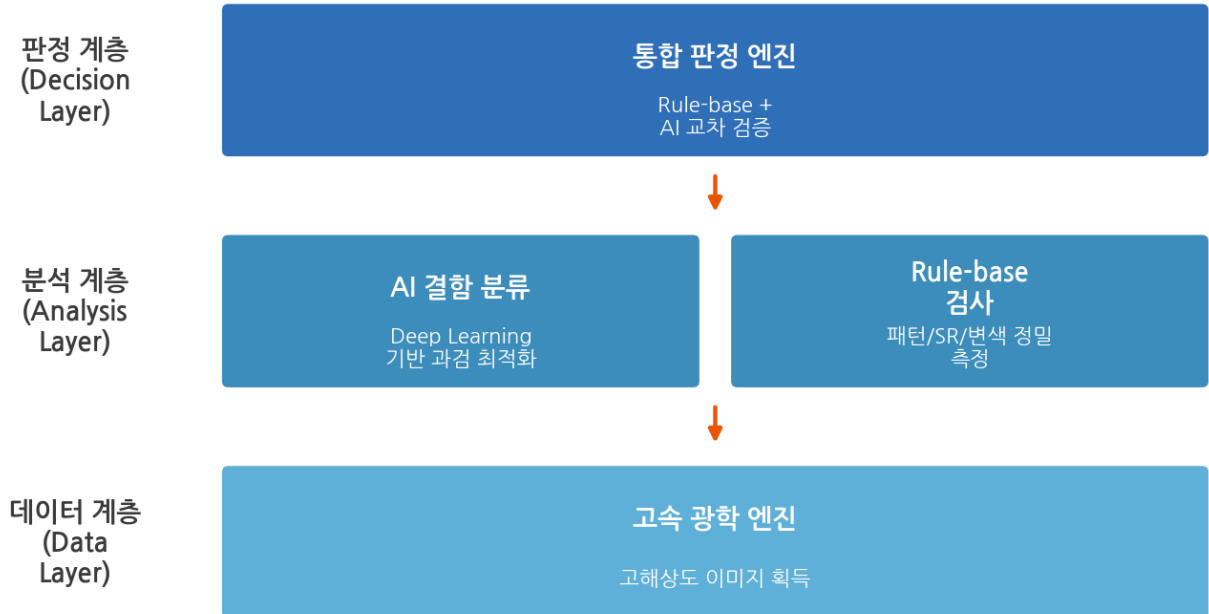


그림 1. 크레셈 병렬 다중 검사 아키텍처 구성

AFVI 병렬 다중 검사 프로세스 흐름

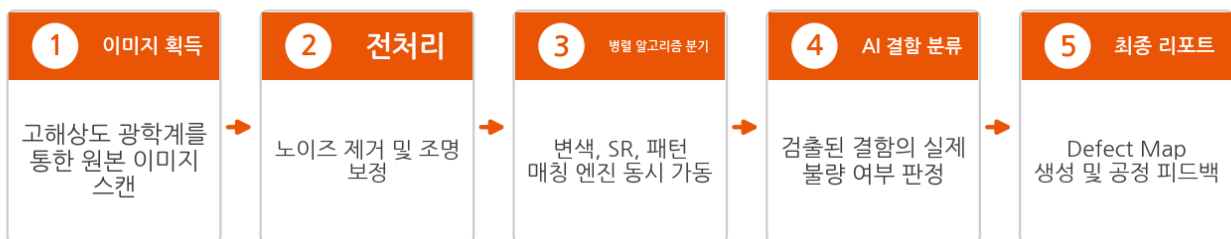


그림 2. AFVI 병렬 다중 검사 프로세스 흐름

4.4. 알고리즘 간 상호 보완 및 통합 분석

위 세 가지 알고리즘은 독립적으로 작동하는 동시에, 상호 보완적인 관계를 형성하여 검사의 신뢰도를 높입니다.

검사 항목	핵심 타겟	주요 알고리즘 기법	결함 유형 예시
-------	-------	------------	----------

변색 (Discoloration)	화학적/표면 상태	CIELAB 색차 분석, ΔE 계산	산화, 오염, 열 변색
SR (Solder Resist)	절연층 무결성	Edge Detection, Morphological Analysis	Misalignment, Pinhole, Scratch
패턴 매칭 (Pattern Matching)	회로 기하학적 구조	Correlation, Sub-pixel Interpolation	Open, Short, Misalignment

표 2. 알고리즘 간 상호 보완 및 통합 분석

예를 들어, **패턴 매칭** 과정에서 특정 영역의 회로가 불분명하게 보일 경우, **변색 알고리즘**이 해당 영역의 색상 편차를 분석하여 이것이 회로 자체의 결함(Open)인지, 아니면 표면 오염에 의한 시각적 노이즈인지를 교차 검증합니다. 또한, **SR 검사**를 통해 확보된 개구부(Opening) 정보를 패턴 매칭의 관심 영역(ROI, Region of Interest) 설정에 활용함으로써, 불필요한 연산을 줄이고 검사 속도(Throughput)를 획기적으로 향상시킵니다. 이러한 통합적 접근 방식은 크레셈 AFVI 솔루션이 높은 검출력과 낮은 과검률을 동시에 유지할 수 있는 기술적 근간이 됩니다.

AI 기반 결함 분류를 통한 과검(Over-kill) 최적화 기술

1. 개요: 검사 공정의 난제, 과검(Over-kill)과 수율(Yield)의 상관관계

고밀도 PCB 및 차세대 패키징 기판(FC-BGA 등)의 제조 공정이 미세화됨에 따라, 검사 장비가 마주하는 가장 큰 기술적 난제는 '**검출력(Detection Capability)**'과 '**판정 정확도(Classification Accuracy)**' 사이의 트레이드오프(Trade-off) 관계입니다.

전통적인 Rule-base 기반의 검사 방식은 설계된 패턴과 실제 이미지 사이의 픽셀 단위 차이를 계산하여 불량을 찾아냅니다. 이때 검사 정밀도를 높이기 위해 임계값(Threshold)을 엄격하게 설정하면, 실제 불량도 놓치지 않지만 미세한 노이즈(Noise), 조명 불균일, 혹은 공정상 허용 가능한 수준의 미세 변동까지 불량으로 판정하는 **과검(Over-kill)** 현상이 발생합니다. 과검이 증가하면 양품을 불량으로 분류하여 버리게 되므로, 결과적으로 제조사의 실질 수율(Yield)을 저하시키고 불필요한 재검사 비용을 발생시킵니다.

크레셈(CRESSEM)은 이러한 문제를 해결하기 위해 단순한 '검출(Detection)' 단계를 넘어, 검출된 객체가 실제 결함인지 아니면 정상적인 노이즈인지를 지능적으로 판별하는 **AI 기반 결함 분류(AI-based Defect Classification)** 기술을 AFVI 솔루션의 핵심 아키텍처로 통합하였습니다. [기업 분석 보고서] (주)크레셈 (CRESSEM): 차세대 반도체

2. AI 기반 결함 분류(Defect Classification)의 메커니즘

크레셈의 AI 검사 솔루션은 Rule-base 알고리즘이 1차적으로 찾아낸 '관심 영역(ROI, Region of Interest)'을 대상으로 **Deep Learning(심층 학습)** 모델을 가동하여 2차 정밀 판정을 수행합니다. 이 과정은 크게 세 단계의 데이터 처리 프로세스로 구분됩니다.

2.1. 특징 추출 및 특징 맵(Feature Map) 생성

Rule-base 검사에서 '의심 결함'으로 분류된 이미지 데이터는 CNN(Convolutional Neural Network) 구조를 가진 AI 모델로 전달됩니다. 모델은 입력된 이미지로부터 결함의 기하학적 형상, 에지(Edge)의 선명도, 질감(Texture), 색상 대비(Contrast) 등 인간의 눈으로는 식별하기 어려운 고차원적인 특징(High-level Features)을 추출합니다. 이 과정에서 미세한 스크래치(Scratch)와 단순한 표면 얼룩(Stain) 사이의 미세한 패턴 차이가 데이터화됩니다.

2.2. 결함 분류(Classification) 및 특징 정제

추출된 특징 맵은 사전 학습된(Pre-trained) 대규모 결함 데이터베이스와 비교됩니다.

- **실제 결함(Real Defect):** Bridge, Missing, Misalignment, Open 등 공정상 치명적인 결함 패턴과 일치하는 경우.
- **노이즈/정상 변동(False Call/Noise):** 조명 반사, 미세 먼지, 회로 패턴의 정상적인 미세 오차 등 실제 기능에 영향이 없는 경우.

AI 모델은 이 두 클래스(Class)를 확률적으로 구분하며, 결함의 종류에 따라 정밀한 라벨링(Labeling)을 수행합니다. [DBpia] 인공지능을 이용한 인쇄 회로 기판 검사방법에 관한 연구

2.3. 과검(Over-kill) 최적화 및 재분류

가장 핵심적인 단계는 '**과검 감소(Over-kill Reduction)**' 단계입니다. Rule-base가 "이 영역은 패턴과 다르다"라고 경고를 보내더라도, AI가 "이 패턴은 허용 범위 내의 정상적인 노이즈다"라고 판단하면 해당 객체를 'Pass'로 재분류합니다. 이를 통해 검사 라인에서 불필요하게 탈락되는 양품을 최소화하여 공정 효율을 극대화합니다.

3. 기술적 심화: Deep Learning 모델을 활용한 수율 향상 원리

크레셈의 AI 솔루션이 제공하는 수율 최적화(Yield Optimization)는 단순히 오판을 줄이는 것을 넘어, 데이터 기반의 공정 제어로 이어집니다.

기술 요소	적용 원리 및 메커니즘	수율(Yield)에 미치는 영향
Knowledge Distillation	거대 모델의 지식을 경량화된 모델로 전이하여 검사 속도 유지 [사내 문서 참조]	검사 속도(Tact Time) 저하 없이 고정밀 판정 가능
Data-free Quantization	데이터 부족 문제를 해결하기 위한 양자화 기술 적용	신규 공정/신규 모델 도입 시 학습 데이터 확보 기간 단축
Continuous Learning	현장에서 발생하는 새로운 유형의 결함을 실시간 학습	공정 변화에 따른 미세 결함 검출력의 지속적 유지

표 3. 기술적 심화: Deep Learning 모델을 활용한 수율 향상 원

3.1. 미세 결함과 노이즈의 구분 능력 (Separation Capability)

전통적인 알고리즘은 픽셀 값의 Δ (변화량)가 특정 임계값을 넘으면 무조건 결함으로 간주합니다. 그러나 크레셈의 AI 모델은 **공간적 맥락(Spatial Context)**을 이해합니다. 예를 들어, 회로 패턴 가장자리에 발생하는 미세한 조명 산란(Scattering)은 픽셀 값의 변화를 일으키지만, AI는 주변 패턴과의 연속성을 분석하여 이를 '정상적인 광학적 현상'으로 인지합니다. 반면, 실제 회로가 끊긴 **단선(Open)**은 패턴의 맥락이 단절된 것을 파악하여 정확하게 결함으로 분류합니다.

3.2. 데이터 기반의 Root Cause Analysis (RCA) 연계

크레셈의 AI 기술은 단순히 Pass/Fail을 결정하는 데 그치지 않고, 분류된 결함 데이터를 통계적으로 분석합니다. 특정 위치에서 반복적으로 발생하는 **Misalignment(정렬 불량)**나 **Bridge(단락)** 데이터를 수집하여, 고객사에게 "현재 Die Bonding 압력이 불균형하거나 Solder Dispensing 양이 과다하다"는 식의 공정 피드백을 제공할 수 있습니다. [기업 분석 보고서] (주)크레셈 (CRESSEM): 차세대 반도체

이러한 **AI 기반 스마트 팩토리 구현** 기술은 검사 장비를 단순한 '감시 도구'에서 '수율 개선 솔루션'으로 격상시키는 크레셈만의 핵심 경쟁력입니다. [기업 분석 보고서] (주)크레셈 (CRESSEM): 차세대 반도체

4. 결론: 차세대 고정밀 패키징 대응을 위한 전략적 가치

HBM(High Bandwidth Memory) 및 FC-BGA와 같은 고부가가치 제품은 적층 수가 늘어나고 피치(Pitch)가 미세화됨에 따라 결함의 크기가 수 μm 단위로 작아지고 있습니다. 이러한 환경에서는 Rule-base 검사만으로 과검을 제어하는 것이 물리적으로 불가능에 가깝습니다.

크레셈의 **AI 기반 결함 분류 및 과검 최적화 기술**은 다음과 같은 전략적 가치를 제공합니다.

1. **수율 극대화:** 과검으로 인한 양품 손실을 방지하여 제조 원가(Cost per Die)를 획기적으로 절감합니다.
2. **검사 신뢰성 확보:** 미세 결함과 노이즈를 명확히 구분함으로써, 검사 결과에 대한 엔지니어의 신뢰도를 높입니다.
3. **공정 지능화:** 결함 데이터를 분석하여 공정 이상을 사전에 감지하고 역추적할 수 있는 기반을 마련합니다.

결론적으로, 크레셈의 AI 통합 비전 솔루션은 급변하는 AI 반도체 시장의 요구사항인 '초미세 공정'과 '고수율 확보'라는 두 가지 목표를 동시에 달성할 수 있는 가장 강력한 기술적 수단입니다. [기업 분석 보고서] (주)크레셈(CRESSEM): 차세대 반도체

경쟁사 기술 비교 분석 (ATI, GigaVis, Trivis, SCREEN)

고밀도 PCB 및 차세대 패키징 기판(FC-BGA 등) 시장의 성장에 따라, AFVI(Automatic Fine Visual Inspection) 시장은 단순한 결함 검출을 넘어 '**검사 정밀도(Inspection Precision)**'와 '**생산성(Throughput)**'이라는 두 마리 토끼를 잡기 위한 기술 경쟁이 심화되고 있습니다. 본 섹션에서는 글로벌 시장을 점유하고 있는 주요 경쟁사(ATI, GigaVis, Trivis, SCREEN)의 기술적 특성을 분석하고, 크레셈(CRESSEM)이 보유한 알고리즘 구성 및 검사 한도(Inspection Limit) 측면에서의 차별적 강점을 벤치마킹 관점에서 상세히 비교합니다.

1. 주요 경쟁사별 기술적 포지셔닝 및 알고리즘 특성

글로벌 검사 장비 시장의 경쟁사들은 각기 다른 타겟 세그먼트와 주력 기술을 보유하고 있습니다. 이들의 기술적 접근 방식은 크게 '**고정밀 Rule-base 중심**'과 '**대면적/고속 스캔 중심**'으로 구분할 수 있습니다.

1.1. ATI: 미세 피치(Fine Pitch) 특화 Rule-base 솔루션

ATI는 주로 COF(Chip on Film), TAB(Tape Automated Bonding), FBGA 등 미세 피치 구현이 필수적인 패키징 기판 검사에 특화되어 있습니다. 이들의 기술적 핵심은 극도로 높은 해상도를 확보하기 위한 전용 광학 엔진과 고정밀 Rule-base 알고리즘에 있습니다. 설계 데이터와 실제 패턴 간의 미세한 차이를 수치적으로 계산하는 데 탁월하지만, Rule-base 알고리즘의 한계로 인해 발생하는 과검(Over-kill) 문제를 해결하기 위한 지능형 알고리즘의 통합은 상대적으로 제한적입니다. [3]

1.2. GigaVis (기가비스): 데이터 피드백 중심의 정밀 검사

GigaVis는 High-Density IC Substrate 시장의 강자로, 검사 결과 데이터를 공정 피드백(Process Feedback)으로 연결하는 데 강점을 가집니다. 이들은 패턴 및 Via(비아) 결함을 정밀하게 수치화하여 불량률의 원인을 분석하는 데 최적화되어 있습니다. Rule-base를 기반으로 하되, 검사된 데이터를 수집하여 수율 관리에 활용하는 시스템적 접근을 취하고 있습니다. [9]

1.3. Trivis (트라이비스): 대면적 및 양면 검사 안정성

Trivis는 주로 Rigid PCB 및 대면적 기판 시장을 타겟으로 하며, 양면 검사(Double-side Inspection) 시의 정렬(Alignment) 안정성과 검사 일관성에 초점을 맞춥니다. 대면적 기판의 경우 검사 영역이 넓어짐에 따라 발생하는 광학적 왜곡을 최소화하는 기술을 보유하고 있으나, 초미세 패턴(Ultra-fine pattern)의 결함 분류 성능에서는 고밀도 패키징 전용 장비 대비 한계가 존재할 수 있습니다. [8]

1.4. SCREEN (스크린): 고속 대량 생산(High-Speed Mass Production)

SCREEN은 대량 생산 라인의 Tact Time(생산 주기)을 극대화하는 데 최적화된 고속 Rule-base 검사 솔루션을 제공합니다. 회로 패턴의 단선/단락 및 이물(Foreign Matter) 검출을 매우 빠른 속도로 수행할 수 있어, 생산성이 최우선인 일반적인 PCB 제조 공정에 적합합니다. 하지만 고속 스캔 과정에서 발생하는 이미지 노이즈와 미세 결함을 구분하는 지능형 판정 능력은 상대적으로 낮을 수 있습니다.

2. 크레셈(CRESSEM) vs 경쟁사 기술 비교 분석 (Benchmarking)

크레셈은 위 경쟁사들이 가진 기술적 장점을 통합하면서도, Rule-base의 '정밀함'과 AI의 '지능적 판단'을 결합한 Hybrid 병렬 아키텍처를 통해 독보적인 검사 한도를 확보하고 있습니다.

비교 항목	크레셈 (CRESSEM)	ATI	GigaVis	Trivis	SCREEN
핵심 알고리즘 구성	Hybrid (Rule-base + AI Parallel)	Rule-base 중심 고정밀 검사	Rule-base + Repair 연계	Rule-base 중심 양면 검사	High-Speed Rule-base
주력 검사 대상	High-Density Substrate (FC-BGA 등)	COF/TAB, FBGA 등 패키징 기판	High-Density IC Substrate	Large-Scale/Rigid PCB	High-Speed Mass Production
검사 항목 범위	변색, SR, 패턴 매칭, AI 결함 분류	SR 결함 및 패턴 결함 특화 [3]	패턴 및 Via 결함 수치화 [9]	외관 및 양면 정렬 검사 [8]	회로 패턴 및 이물 검사
과검(Over-kill) 제어	AI 기반 결함 분류로 최소화 [2, 7]	Rule-base 설정에 의존	데이터 피드백 기반 관리	물리적 정렬 정밀도 중심	속도 우선으로 인한 과검 발생 가능성
기술적 강점	고정밀 광학 + AI 지능형 판정	미세 피치 전용 광학 엔진	결함 데이터의 정밀 피드백 [9]	대면적 검사 안정성 [8]	고속 스캔 시의 일관성

표 4. 크레셈(CRESSEM) vs 경쟁사 기술 비교 분석 (Benchmarking)

3. 크레셈의 기술적 우위 및 차별화 포인트 (Deep Analysis)

3.1. 알고리즘의 병렬성(Parallelism)을 통한 검사 한도 확장

경쟁사들이 주로 단일 목적의 알고리즘(예: 패턴 매칭 전용 또는 SR 검사 전용)을 순차적으로 수행하는 것과 달리, 크레셈은 Rule-base와 AI 알고리즘을 병렬(Parallel)로 구동합니다. 이는 다음과 같은 기술적 이점을 제공합니다.

- **검사 항목의 다각화:** 변색(Discoloration), SR(Solder Resist), 패턴 매칭(Pattern Matching)을 동시에 수행함으로써, 단일 알고리즘으로는 놓치기 쉬운 복합 결함을 잡아낼 수 있습니다. [1, 2]
- **검사 한도(Inspection Limit)의 극대화:** Rule-base가 매우 미세한 물리적 변화를 감지하면, 동시에 작동하는 AI 모델이 해당 변화가 '실제 결함(Defect)'인지 '정상적인 노이즈(Noise)'인지를 실시간으로 판정합니다. 이를 통해 검사 정밀도를 높이면서도 불필요한 불량 판정을 획기적으로 줄입니다. [7]

3.2. AI 기반 결함 분류를 통한 과검(Over-kill) 최적화

기존 Rule-base 방식의 가장 큰 고충은 '검사 강도(Inspection Intensity)'와 '과검률(Over-kill Rate)' 사이의 트레이드오프(Trade-off)입니다. 검사 강도를 높이면 미세 결함은 잘 잡히지만, 정상적인 제품을 불량으로 판정하는 과검이 급증하여 고객사의 수율을 저하시킵니다.

크레셈은 이 문제를 Deep Learning 기반 결함 분류(Defect Classification) 기술로 해결합니다.

- **노이즈 분리 기술:** 회로 패턴의 미세한 거칠기(Roughness)나 광학적 잔상 등을 AI가 학습하여, 이를 실제 결함과 구분해 냅니다. [2, 7]
- **수율(Yield) 직접 기여:** 과검률을 낮춤으로써 고객사가 불필요한 재검사(Re-inspection)나 폐기(Scrap)를 줄이게 하여, 실질적인 제조 수율 향상에 직접적으로 기여합니다. [11]

3.3. 고밀도 패키징(FC-BGA) 대응력

최근 HBM 및 FC-BGA 시장의 급성장으로 인해 기판의 피치(Pitch)가 극도로 미세해지고 있습니다. ATI가 미세 피치 광학계에서 강점을 보이고, GigaVis가 데이터 피드백에서 강점을 보인다면, 크레셈은 '**미세 피치 대응 광학 기술**'과 '**AI 지능형 분류**'를 결합하여 차세대 고밀도 기판 검사의 표준을 제시하고 있습니다. 특히, 단순한 외관 검사를 넘어 공정상의 불량 원인을 역추적(Root Cause Analysis)할 수 있는 데이터 분석 솔루션까지 제공함으로써 단순 장비 제조사를 넘어 고객사의 수율 파트너로서의 입지를 굳히고 있습니다. [11, 12]

검사 성능 및 공정 효율성(Throughput) 기대 효과

AFVI(Automatic Fine Visual Inspection) 공정에서 다중 검사(Multi-Inspection) 알고리즘 아키텍처를 도입하는 궁극적인 목적은 단순히 결함 검출률(Detection Rate)을 높이는 것에 그치지 않습니다. 고밀도 기판(High-Density Substrate) 제조 라인의 핵심 경쟁력은 **검사 정밀도(Precision)**를 유지하면서도, 전체 생산 라인의 **처리량(Throughput)**을 극대화하고 **택 타임(Tact Time)**을 최소화하여 공정 효율성(Efficiency)을 확보하는 데 있습니다.

크레셈(CRESSEM)의 병렬 다중 검사 솔루션이 제조 현장에 가져오는 정량적·정성적 기대 효과를 다음과 같이 분석합니다.

1. 병렬 처리 아키텍처를 통한 Tact Time 최적화

전통적인 단일 알고리즘 기반의 검사 방식은 검사 항목(변색, SR, 패턴 매칭 등)이 추가될 때마다 검사 시간이 선형적으로 증가하는 구조적 한계를 가집니다. 즉, 검사 항목이 N개일 경우, 전체 검사 시간은 각 항목의 검사 시간을 모두 합산한 값에 비례하게 되어 생산성이 급격히 저하됩니다.

반면, 크레셈의 **병렬 다중 검사(Parallel Multi-Inspection)** 아키텍처는 다음과 같은 메커니즘을 통해 Tact Time을 획기적으로 단축합니다.

- **알고리즘 동시 실행(Simultaneous Execution):** Rule-base 기반의 패턴 매칭 엔진과 AI 기반의 결함 분류 엔진이 독립적인 프로세스로 작동합니다. Rule-base 엔진이 물리적인 결함(Open, Short, Misalignment)을 스캔하는 동안, AI 엔진은 실시간으로 유입되는 이미지 데이터를 학습된 모델을 통해 분류함으로써 검사 사이클 내에서 연산 병목 현상을 제거합니다. [2]
- **검사 데이터의 계층적 처리:** 모든 데이터를 전수 조사하여 고부하 연산을 수행하는 대신, 1차적으로 Rule-base 알고리즘이 고속 스캔을 수행하고, 의심 영역(Candidate Area)에 대해서만 AI 알고리즘이 정밀 분석을 수행하는 '**계층적 검사 구조**'를 채택합니다. 이를 통해 전체 스캔 속도를 유지하면서도 정밀도를 확보할 수 있습니다.

2. 과검(Over-kill) 감소에 따른 실질적 생산성(Yield) 증대

검사 장비의 성능을 평가할 때 흔히 간과되는 지표가 바로 **과검률(Over-kill Rate)**입니다. 과검이란 실제 불량이 아님에도 불구하고 장비가 불량으로 판정하는 현상을 의미합니다. 과검이 높을 경우, 생산 라인에서는 다음과 같은 심각한 효율성 저하가 발생합니다.

1. **재검사(Re-inspection) 부하 증가:** 과검된 제품을 분류하기 위해 수동 검사(Manual Inspection) 인력이 투입되어야 하며, 이는 인건비 상승과 전체 공정 흐름의 지연을 초래합니다.

2. **가용 자원 낭비:** 불필요한 불량 판정으로 인해 양품(Good Die/Unit)이 폐기되거나 재작업(Rework) 공정으로 유입되어, 실제 수율(Yield)이 하락하는 경제적 손실이 발생합니다.

크레셈의 **AI 기반 결함 분류 기술**은 미세 결함(Defect)과 단순 노이즈(Noise, 예: 미세한 표면 질감 차이, 조명 불균일 등)를 명확히 구분합니다. [2, 7] 이를 통해 과검을 최소화함으로써, 검사 후 후속 공정으로 넘어가는 제품의 흐름을 원활하게 유지하고, 검사 단계에서 발생하는 병목 현상을 근본적으로 해결합니다.

3. Throughput 및 공정 효율성 비교 분석

다중 검사 도입 전후의 공정 효율성을 비교하면 다음과 같은 지표 변화를 기대할 수 있습니다. (※ 아래 수치는 기술적 특성에 기반한 추정치입니다.)

분석 지표	단일 알고리즘 방식 (Traditional)	크레셈 병렬 다중 검사 (Advanced)	기대 효과 및 비교
Tact Time (검사 주기)	uparrow (항목 추가 시 급증)	downarrow (병렬 처리로 안정화)	검사 항목 증가 대비 시간 증가율 최소화
Throughput (시간당 생산량)	낮음 (Sequential Processing)	높음 (Parallel Processing)	단위 시간당 처리 가능한 기판 수 극대화
Over-kill Rate (과검률)	높음 (Rule-base의 한계)	매우 낮음 (AI-Driven)	불필요한 재검사 및 인력 투입 방지
공정 효율성 (Efficiency)	낮음 (병목 구간 발생)	최적화 (Seamless Flow)	전체 생산 라인의 흐름(Flow) 안정화

표 5. Throughput 및 공정 효율성 비교 분석

4. 종합 결론: 스마트 팩토리 구현을 위한 핵심 동력

결론적으로, 크레셈의 AFVI 솔루션은 단순한 '검사 도구'를 넘어 **생산성 최적화 엔진**의 역할을 수행합니다. 고속 광학 엔진과 AI 알고리즘의 결합은 제조사가 요구하는 **고속/고정밀/저과검**이라는 세 가지 상충하는 요구사항을 동시에 만족시킵니다.

특히, 검사 과정에서 축적된 결함 데이터를 분석하여 공정상의 불량 원인을 역추적(Root Cause Analysis)할 수 있는 데이터 분석 솔루션과 연계될 경우, 고객사는 단순한 검사를 넘어 **수율(Yield) 향상에 직접적으로 기여하는 스마트 팩토리(Smart Factory) 환경**을 구축할 수 있습니다. [11, 12] 이는 고부가가치 제품인 HBM 및 FC-BGA 시장에서 크레셈의 장비가 갖는 강력한 경제적 가치입니다.

결론 및 기술적 시사점

본 보고서에서 분석한 바와 같이, 고밀도 기판(High-Density Substrate) 제조 공정의 고도화는 단순한 광학적 해상도 향상을 넘어, 복합적인 결함을 얼마나 빠르고 정확하게 분류하느냐는 **'지능형 검사 역량'**의 싸움으로 전개되고 있습니다. 크레셈(CRESSEM)의 AFVI(Automatic Fine Visual Inspection) 솔루션은 Rule-base 기반의 정밀 검사와 AI 기반의 지능형 분류를 결합한 **병렬 다중 검사(Parallel Multi-Inspection) 아키텍처**를 통해 차세대 반도체 패키징 시장을 선도할 준비를 마쳤습니다.

크레셈 AFVI 기술의 전략적 가치는 다음과 같은 세 가지 핵심 요소로 요약됩니다.

첫째, **검사 한도(Inspection Limit)의 극대화와 수율(Yield) 최적화**입니다. 변색, SR(Solder Resist), 패턴 매칭 등 각기 다른 물리적 특성을 가진 결함을 독립적인 알고리즘으로 동시 처리함으로써, 기존 단일 알고리즘 체제에서 발생하던 검사 사각지대를 제거하였습니다. 특히 Deep Learning을 활용한 결함 분류 기술은 미세 결함과 단순 노이즈를 명확히 구분하여, 생산 현장의 고질적인 문제인 **과검(Over-kill)**률을 획기적으로 낮추고 실질적인 공정 수율을 제고하는 데 결정적인 기여를 합니다. [2, 7]

둘째, **생산성(Throughput)과 정밀도의 상충 관계(Trade-off) 극복**입니다. 다중 검사 알고리즘을 병렬로 운영하는 아키텍처는 검사 항목이 복잡해지더라도 전체 **Tact Time(생산 주기)의 증가를 최소화**합니다. 이는 고속 대량 생산이 필수적인 FC-BGA 및 차세대 고밀도 기판 제조 라인에서 크레셈의 장비가 강력한 경쟁 우위를 점할 수 있는 핵심 동력입니다. [2]

셋째, **미래 기술 변화에 대한 유연한 대응력**입니다. HBM4 도입과 함께 예고된 Hybrid Bonding(구리 직접 접합) 기술 등 차세대 패키징 공정은 더욱 미세하고 정밀한 검사 모듈을 요구합니다. 크레셈은 현재의 광학 검사 기술력을 바탕으로, 초미세 간극 측정 및 데이터 기반의 **Root Cause Analysis(불량 원인 역추적)** 솔루션으로 진화함으로써 단순 검사 장비를 넘어 고객사의 스마트 팩토리 구현을 돕는 전략적 파트너로서의 입지를 공고히 할 것입니다. [12]

결론적으로, 크레셈의 AFVI 솔루션은 고성능화되는 AI 반도체 공급망 내에서 '**고정밀 검사**'와 '**고효율 생산**'이라는 두 마리 토끼를 동시에 잡을 수 있는 대체 불가능한 핵심 기술 자산으로서 그 가치가 매우 높다고 판단됩니다.

참고 자료

1. [인공지능을 이용한 인쇄 회로 기판 검사방법에 관한 연구 | DBpia](<https://www.dbpia.co.kr/journal/detail?nodeId=T16663089>)
2. [[보고서]Bump 검사용 3D AFVI (Confocal Type) 개발 - 사이언스온](<https://scienceon.kisti.re.kr/srch/selectPORSrchReport.do?cn=TRKO201400014462>)
3. [[보고서]Color (Hybrid) AFVI 개발 - 사이언스온](<https://scienceon.kisti.re.kr/srch/selectPORSrchReport.do?cn=TRKO201500017267>)
4. [DBpia - 국내 논문, 학술지, 잡지까지 제공하는 학술 AI 플랫폼](<https://www.dbpia.co.kr/>)
5. [기판 검사 공정 (4) - 호랑나비](<https://whitetigertwo.tistory.com/35>)
6. [원문보기 - ScienceON](<https://scienceon.kisti.re.kr/commons/util/originalView.do?cn=TRKO201400014462&dbt=TRKO>)
7. [(PDF) Automated Visual Inspection System for Enhanced PCB Manufacturing Quality](<https://www.researchgate.net/publication/384887699AutomatedVisualInspectionSystemforEnhancedPCBManufacturingQuality>)
8. [Co-ms | Afvi](<http://www.co-ms.co.kr/ko/biz/pcb-page11.php>)
9. pdf_인하대학교컴퓨터공학과배승환20260509001.pdf (사내 자료)
10. ProfessorSeungHwanBaeReport.pdf (사내 자료)
11. pdfHBMHighBandwidt20260508001.pdf (사내 자료)
12. pdfHBMHighBandwidt20260508002.pdf (사내 자료)
13. 매뉴얼HBMAAdvancedInspectionSyst20260509001.pdf (사내 자료)
14. pdf1서론HBM시장의패러다임변화20260508001.pdf (사내 자료)
15. 분석_크레셈CRESSEM20260509001.pdf (사내 자료)