

HBM4 기술 진화에 따른 차세대 검사 솔루션 및 대응 전략 보고서

문서번호 CRSM-AI-2026-AUTO

작성일 2026-07-07

작성 Cressem AI 시스템 (자동 생성)

보안등급 사내 비밀 (Confidential)

버전 v1.0

목 차

HBM4 기술 진화에 따른 차세대 검사 솔루션 및 대응 전략 보고서	3
개요 (Executive Summary)	3
HBM4 핵심 기술 패러다임 변화	3
크레셈(CRESSEM)의 기술적 대응 및 차별화 전략	7
결론 및 시사점 (Conclusion & Implications)	9

HBM4 기술 진화에 따른 차세대 검사 솔루션 및 대응 전략 보고서

HBM4의 커스텀 로직 다이 도입 및 하이브리드 본딩 기술 변화를 분석하고, 이에 따른 고정밀 검사 요구사항과 크레셈의 기술적 대응 방안을 제시함.

개요 (Executive Summary)

본 보고서는 AI(Artificial Intelligence) 반도체 시장의 폭발적인 성장과 함께 메모리 반도체의 패러다임을 근본적으로 변화시키고 있는 **6세대 고대역폭 메모리(HBM4)**의 기술적 진화 양상을 분석하고, 이에 따른 차세대 검사 솔루션의 대응 전략을 수립하는 데 목적을 두고 있습니다. 2026년 현재, AI 가속기 및 고성능 컴퓨팅(HPC) 인프라의 핵심 구성 요소로서 HBM의 수요는 단순한 양적 성장을 넘어, 성능의 한계를 돌파하기 위한 질적 전환기를 맞이하고 있습니다 [출처: news.skhynix.com].

최근 시장 트렌드는 기존의 범용(Commodity) HBM 시대에서 벗어나, 고객사의 특정 연산 요구사항에 최적화된 **커스텀 HBM(Custom HBM)** 시대로 급격히 이동하고 있습니다. 특히 HBM4 세대에 이르러 도입되는 **로직 베이스 다이(Logic Base Die)** 구조는 메모리 제조사와 파운드리(Foundry) 간의 긴밀한 협업을 요구하며, 이는 기존의 단순 적층 기술을 넘어선 이종 집적(Heterogeneous Integration) 기술의 정점을 보여줍니다 [출처: files-scs.pstatic.net]. 이러한 구조적 변화는 데이터 전송 대역폭(Bandwidth)을 기존 HBM3e 대비 2배 이상 확대하는 결과를 가져왔으나, 동시에 제조 공정의 난이도를 극단적으로 높이는 결과를 초래했습니다 [출처: samsungpop.com].

HBM4의 기술적 진보를 뒷받침하는 핵심 요소인 **하이브리드 본딩(Hybrid Bonding)** 기술과 **고단 적층(12단/16단 이상)** 공정은 초미세 피치(Fine Pitch) 구현을 가능하게 하지만, 공정 과정에서 발생하는 **Warping(휨 현상)**, **Alignment(정렬) 오차**, 그리고 고속 신호 전달 시의 **Signal Integrity(신호 무결성)** 저하 등 새로운 기술적 병목 구간(Bottleneck)을 형성하고 있습니다. 특히 적층 수가 증가함에 따라 발생하는 열 관리(Thermal Management) 이슈와 미세한 결함이 전체 수율(Yield)에 미치는 치명적인 영향력은 검사 장비의 정밀도에 대한 요구 수준을 전례 없는 수준으로 끌어올리고 있습니다 [출처: koreascience.kr].

이에 따라 본 보고서에서는 HBM4 공정 전반에서 발생하는 주요 결함 유형을 식별하고, 이를 효과적으로 제어하기 위한 **고정밀 광학 검사** 및 **AI 기반 비전 알고리즘**의 적용 방안을 심도 있게 다룹니다. 나아가, 반도체 검사 장비 전문 기업인 **크레셈(CRESSEM)**이 보유한 차별화된 기술력을 바탕으로, 고객사의 공정 특성에 최적화된 **Customized Inspection System** 및 데이터 기반의 **수율 최적화 솔루션**을 통해 차세대 HBM 시장의 주도권을 확보하기 위한 전략적 로드맵을 제시하고자 합니다.

HBM4 핵심 기술 패러다임 변화

HBM4(High Bandwidth Memory 4)의 등장은 단순히 데이터 전송 속도를 높이는 차세대 메모리의 등장을 넘어, 메모리 반도체의 정의와 제조 패러다임을 근본적으로 뒤흔드는 구조적 전환점을 의미합니다. 기존 HBM3E까지의 세대가 메모리 제조사가 설계한 표준 규격의 DRAM을 수직으로 쌓아 올리는 '메모리 중심의 패키징'이었다면, HBM4부터는 고객사(AI 가속기 설계사)의 요구사항에 따라 로직(Logic) 기능이 통합되는 **커스텀 HBM(Custom HBM)** 체제로의 진입을 예고하고 있습니다 [출처: news.skhynix.com].

2.1. Custom HBM과 로직 베이스 다이(Logic Base Die)의 도입

HBM4 기술 진화의 핵심은 기존의 DRAM 공정으로 제작되던 베이스 다이(Base Die)가 파운드리(Foundry)의 첨단 로직 공정으로 전환된다는 점입니다. 이는 **이종 집적(Heterogeneous Integration)** 기술의 극치로, 메모리

다이(DRAM Die)와 로직 다이(Logic Die)가 서로 다른 공정 기술을 통해 최적화된 상태로 결합되는 구조를 가집니다.

1. 로직 베이스 다이의 역할 변화:

기존 세대에서는 베이스 다이가 단순히 상단 DRAM 다이들과의 신호 전달을 돕는 인터페이스 역할에 국한되었습니다. 그러나 HBM4에서는 이 베이스 다이가 일종의 '작은 프로세서' 역할을 수행하게 됩니다. 고객사(예: NVIDIA, AMD 등)는 AI 연산의 효율을 극대화하기 위해 베이스 다이에 특정 연산 로직이나 데이터 처리 알고리즘을 직접 구현하기를 원하며, 이를 통해 시스템 전체의 지연 시간(Latency)을 줄이고 전력 효율을 높일 수 있습니다 [출처: files-scs.pstatic.net].

2. 커스텀(Customized) 생태계의 구축:

이러한 변화는 메모리 반도체 공급망(Supply Chain)의 재편을 의미합니다. 메모리 제조사는 더 이상 표준 제품을 대량 생산하는 것에 그치지 않고, 파운드리 업체와 협력하여 고객사 맞춤형 IP(Intellectual Property)를 로직 다이에 탑재해야 합니다. 실제로 SK하이닉스는 커스텀 HBM 전담 조직인 **C-HBM**을 운영하며, TSMC와 같은 파운드리 리더와의 동맹을 통해 이러한 맞춤형 요구사항을 충족하기 위한 전략적 행보를 보이고 있습니다 [출처: files-scs.pstatic.net].

2.2. 데이터 인터페이스의 폭발적 확장 (I/O Scalability)

구조적 변화와 함께 데이터 전송 통로인 I/O(Input/Output) 단자 수의 급격한 증가는 HBM4의 성능을 결정짓는 핵심 지표입니다.

- **I/O 단자 수의 2배 확대:** HBM3e 세대까지는 1,024개의 I/O를 통해 데이터 전송이 이루어졌으나, HBM4에서는 이 수치가 **2,048개**로 확대될 전망입니다 [출처: samsungpop.com].
- **대역폭(Bandwidth)의 비약적 향상:** I/O 단자의 증가는 곧 데이터 통로의 확장을 의미하며, 이는 AI 가속기가 요구하는 초고속 데이터 처리를 가능하게 합니다. 특히 데이터 전송 속도가 HBM3의 7.2 Gbps 수준에서 HBM4에서는 **12.8 Gbps** 이상으로 상향됨에 따라, 신호 무결성(Signal Integrity)을 유지하면서 초고속 통신을 구현하는 것이 기술적 난제가 되고 있습니다 [출처: <https://www.signalintegrityjournal.com/ext/resources/PDFs/DC25PAPERTrack05InnovativeInterposerSolutionsforHBMIIlmparidhiV6.pdf>].

2.3. HBM4 아키텍처 구성 요소

HBM4의 아키텍처는 크게 연산을 담당하는 로직 계층과 데이터를 저장하는 메모리 계층으로 구분되며, 이들 사이의 유기적인 연결이 성능의 핵심입니다.

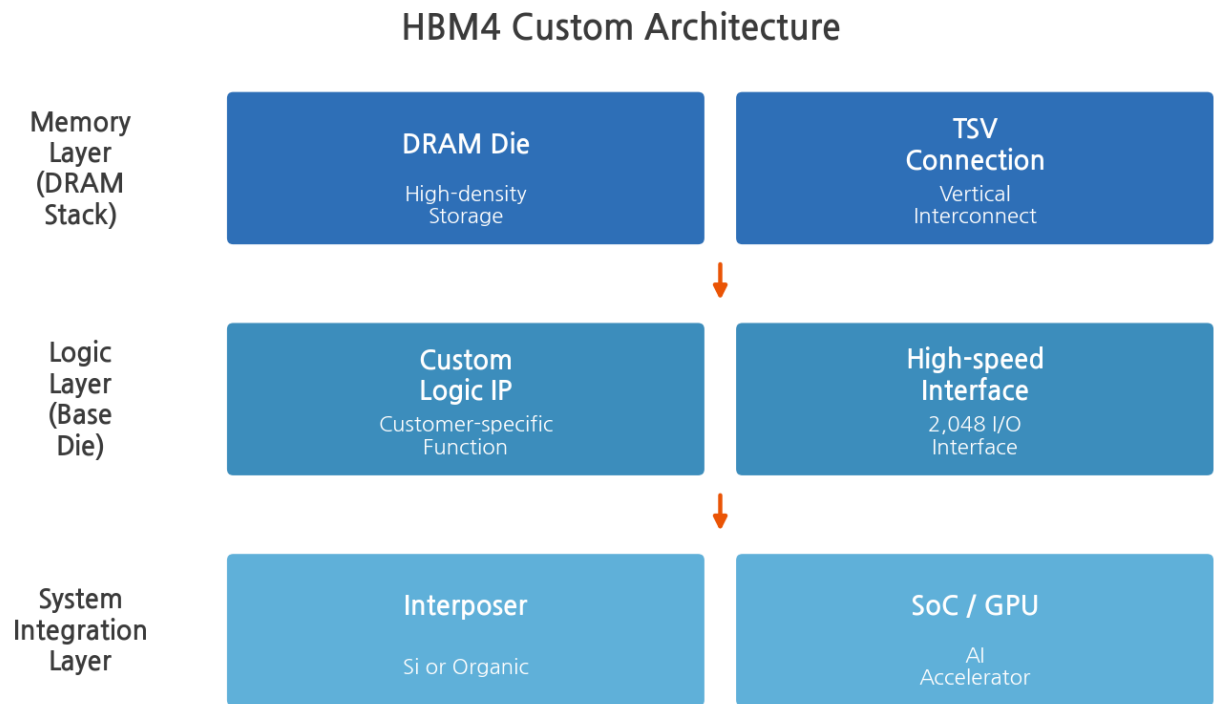


그림 1. HBM4 Custom Architecture

HBM4 하이브리드 본딩 적층 구조

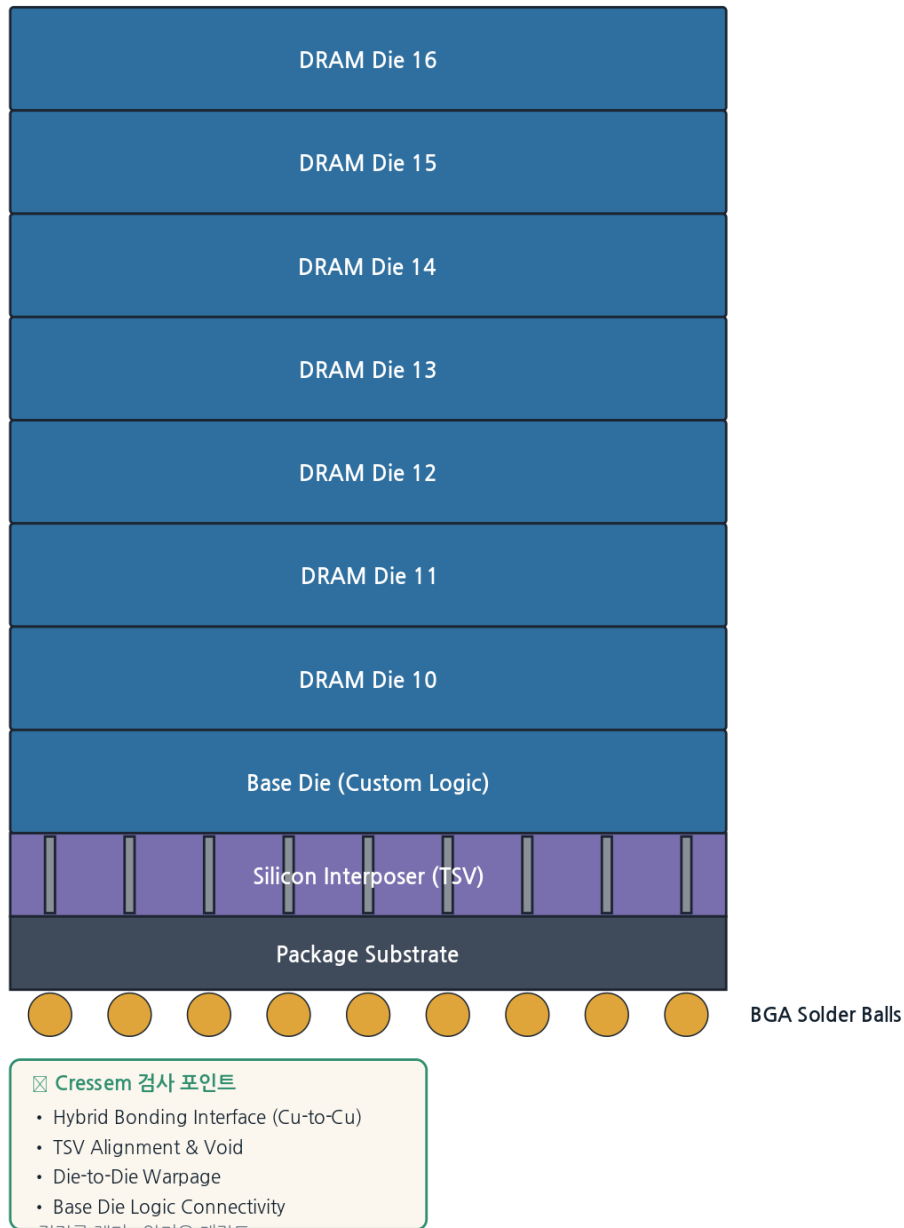


그림 2. HBM4 하이브리드 본딩 적층 구조 단면도

CRESSEM HBM4 Inspection Technology Roadmap



그림 3. CRESSEM HBM4 Inspection Technology Roadmap

가. 단기 목표: 고속·고정밀 광학 검사 체계 확립

현재의 HBM3E 및 HBM4 초기 양산 단계에 맞춰, 기존의 검사 속도(UPH)를 유지하면서도 측정 정밀도를 향상시키는 데 집중합니다. 특히 Die-to-Die 정렬(Alignment) 오차와 미세 뿔프(Bump)의 형상 검사를 위한 고속 스캔 기술을 고도화합니다.

나. 중장기 목표: Hybrid Bonding 및 AI 통합 플랫폼 완성

HBM4 이후 본격화될 Hybrid Bonding 공정에서는 기존의 Bump가 사라지므로, 접합면 자체의 평탄도(Flatness)와 미세 이물질을 검출하는 기술이 필수적입니다. 크레셈은 이 시점에 맞춰 **광학-X-ray-AI가 통합된 'All-in-One' 검사 플랫폼**을 완성하여, 고객사의 공정 특성에 최적화된 맞춤형(Customized) 솔루션을 제공함으로써 시장의 기술적 진입장벽을 구축할 계획입니다 [출처: 분석_크레셈CRESSEM20260509001.pdf].

크레셈(CRESSEM)의 기술적 대응 및 차별화 전략

HBM4로 대변되는 차세대 메모리 시장의 패러다임 변화는 단순한 성능 향상을 넘어, 패키징 구조의 근본적인 변혁을 요구하고 있습니다. 특히 로직 다이(Logic Die)가 결합된 커스텀 HBM의 등장과 하이브리드 본딩(Hybrid Bonding) 기술의 도입은 기존의 Rule-based 검사 방식으로는 대응할 수 없는 미세 결함과 공정 변수를 야기합니다. 이에 크레셈(CRESSEM)은 고객사의 공정 특성에 최적화된 **고객 맞춤형(Customized) 검사 시스템**과 **AI 기반 수율 최적화(Yield Enhancement) 솔루션**을 양대 축으로 삼아 차별화된 시장 대응 전략을 전개하고 있습니다.

1. 고객 맞춤형(Customized) 검사 시스템 구축 전략

반도체 제조사(IDM 및 Foundry)들은 각기 다른 적층 방식, 사용되는 소재, 그리고 독자적인 공정 프로세스를 보유하고 있습니다. HBM4 시대에는 고객사마다 요구하는 Base Die의 사양과 적층 높이, 그리고 인터포저(Interposer)의 종류가 상이하므로, 시장에 출시된 기성 제품(Off-the-shelf)만으로는 복잡한 공정 변수를 완벽히 제어하기 어렵습니다.

크레셈은 이러한 시장의 요구에 부응하기 위해 **Customized Inspection System**을 핵심 비즈니스 모델로 채택하고 있습니다.

- **공정 맞춤형 모듈 설계:** 고객사의 특정 공정(예: TSV 형성, Die-to-Die 정렬, 하이브리드 본딩 접합 등)에서 발생하는 고유한 결함 유형을 분석하여, 해당 결함만을 정밀하게 타격할 수 있는 광학 엔진과 조명 시스템을 설계합니다.
- **유연한 하드웨어 통합(Hardware Integration):** 고객사의 기존 생산 라인(Production Line) 내 Tact Time(생산 주기)을 저해하지 않으면서도, 신규 공정 장비와 원활하게 인터페이스할 수 있는 모듈형 검사 플랫폼을 제공합니다.

이는 고객사가 새로운 패키징 기술을 도입할 때 검사 장비를 교체하는 대신, 크레셈의 모듈을 통해 신속하게 대응할 수 있도록 하여 강력한 **고객 락인(Lock-in) 효과**를 창출합니다 [출처: 분석_크레셈CRESSEM20260509001.pdf].

- **차세대 본딩 대응 기술:** 하이브리드 본딩과 같이 초미세 간극(Gap) 측정이 필수적인 공정을 위해, 기존의 Bump 검사를 넘어선 초정밀 간극 측정 모듈 및 비파괴 검사 솔루션을 개발하여 고객사의 차세대 공정 전환을 지원합니다 [출처: 분석_크레셈CRESSEM20260509001.pdf].

2. AI 기반 수율 최적화(Yield Enhancement) 및 스마트 팩토리 구현

단순히 불량(Defect)을 찾아내는 '검출(Detection)'의 단계를 넘어, 검사 데이터를 통해 공정의 이상 징후를 파악하고 수율을 실질적으로 끌어올리는 '분석(Analysis)' 단계로의 진화는 크레셈의 핵심 경쟁력입니다.

- **AI 기반 지능형 결함 분류(AI-Driven Defect Classification):** 기존의 Rule-based 방식은 미세한 노이즈와 실제 결함을 구분하지 못해 발생하는 과검(Over-kill) 문제로 인해 수율 손실을 초래해 왔습니다. 크레셈은 **Deep Learning 기반의 AI 알고리즘**을 검사 엔진에 통합하여, 미세 결함과 정상적인 공정 노이즈를 고도로 정밀하게 구분합니다. 이를 통해 과검률을 획기적으로 낮춤으로써 고객사의 가용 수율을 극대화합니다 [출처: 분석_크레셈CRESSEM20260509001.pdf].

- **공정 역추적 및 근본 원인 분석(Root Cause Analysis, RCA):** 크레셈의 검사 솔루션은 검출된 결함 데이터를 단순 저장하는 것에 그치지 않고, 이를 공정 데이터와 연계하여 분석합니다. AI가 결함의 패턴을 학습하여 해당 불량이 어느 공정 단계(예: 식각 불균일, 증착 오류, 본딩 압력 이상 등)에서 기인했는지를 역추적할 수 있는 통찰을 제공합니다. 이는 고객사가 공정 조건을 실시간으로 최적화할 수 있도록 돕는 스마트 팩토리(Smart Factory) 구현의 핵심 요소입니다 [출처: 분석_크레셈CRESSEM20260509001.pdf].

- **고속 광학 엔진과 데이터 처리:** HBM4의 고단 적층 공정에서 발생하는 방대한 양의 검사 데이터를 실시간으로 처리하기 위해, 고해상도 카메라와 정밀 조명 제어 기술이 결합된 **고속 광학 엔진(High-speed Optical Engine)**을 운용합니다. 이는 검사 정밀도를 유지하면서도 생산 라인의 생산성을 저해하지 않는 고성능 솔루션을 가능케 합니다 [출처: 분석_크레셈CRESSEM20260509001.pdf].

3. 전략적 요약 및 기대 효과

크레셈의 대응 전략은 하드웨어의 정밀도와 소프트웨어의 지능화를 결합한 **통합 검사 솔루션(Integrated Inspection Solution)**으로 요약됩니다.

구분	핵심 전략	기대 효과 (Value Proposition)
Hardware	Customized Inspection	고객사별 최적화된 검사 환경 제공 및 설비 투자 효율성 극대화
Software	AI-Driven Vision	과검(Over-kill) 방지를 통한 실질 수율(Yield) 향상 및 검사 신뢰도 확보
Data/System	Smart Factory Solution	불량 원인 역추적(RCA)을 통한 공정 안정화 및 제조 지능화 실현

표 1. 전략적 요약 및 기대 효과

결론적으로, 크레셈은 HBM4 공정의 기술적 난제인 초미세화와 고단 적층 문제를 해결하기 위해, 단순 장비 공급사를 넘어 고객사의 수율 향상을 책임지는 **데이터 기반의 기술 파트너(Data-driven Technology Partner)**로서의 입지를 공고히 하고 있습니다 [출처: 분석_크레셈CRESSEM20260509001.pdf].

결론 및 시사점 (Conclusion & Implications)

HBM4(High Bandwidth Memory 4)로의 전환은 단순한 세대 교체를 넘어, 메모리 반도체가 시스템 반도체의 영역으로 확장되는 '**메모리-로직 융합(Memory-Logic Convergence)**'의 시대가 도래했음을 의미합니다. 본 보고서를 통해 분석한 바와 같이, 커스텀 HBM 구조의 도입과 하이브리드 본딩(Hybrid Bonding) 기술의 적용은 데이터 전송 대역폭의 혁신적인 향상을 가져오겠지만, 동시에 제조 공정의 복잡도와 검사 난이도를 전례 없는 수준으로 끌어올릴 것입니다.

HBM4 시장의 주도권을 확보하기 위한 전략적 시사점은 다음과 같습니다.

첫째, **검사 패러다임의 전환(Shift in Inspection Paradigm)**이 필수적입니다. 기존의 Rule-based 방식이나 단순한 Bump 검사로는 하이브리드 본딩 공정에서 발생하는 초미세 결함(Sub-micron Defect)이나 접합면의 미세 이물질(Particle)을 제어하기 어렵습니다. 따라서 초고해상도 광학 엔진과 결합된 **AI 기반 지능형 비전 솔루션**을 통해 미세 결함과 정상 노이즈를 완벽히 구분하고, 과검(Over-kill)률을 최소화하는 기술적 우위 확보가 최우선 과제입니다.

둘째, **수율(Yield) 관리의 핵심 동력으로서의 데이터 분석 역량**이 요구됩니다. HBM4는 적층 단수가 12단에서 16단 이상으로 증가함에 따라, 단 한 번의 공정 오류가 전체 스택의 폐기로 이어지는 치명적인 구조를 가집니다. 단순히 불량을 검출하는 단계에서 나아가, 검사 데이터를 기반으로 공정상의 불량 원인을 역추적하는 **근본 원인 분석(Root Cause Analysis, RCA)** 솔루션을 제공함으로써 고객사의 수율 향상에 직접적으로 기여하는 '수율 파트너'로서의 포지셔닝이 필요합니다.

셋째, **고객 맞춤형(Customized) 대응 체계의 구축**입니다. HBM4부터는 파운드리 공정이 결합된 커스텀 제품이 주를 이루기 때문에, 각 고객사(SK하이닉스, 삼성전자 등) 및 설계 업체(NVIDIA, Apple 등)마다 상이한 적층 방식과 인터페이스 규격을 가질 것입니다. 크레셈(CRESSEM)은 기성 제품(Off-the-shelf)이 아닌, 고객사의 특화된 공정 프로세스에 최적화된 **Customized Inspection System**을 제공함으로써 강력한 고객 락인(Lock-in) 효과를 창출해야 합니다.

결론적으로, 2026년 이후 펼쳐질 AI 반도체 슈퍼 사이클(Supercycle)에서 HBM4는 시장의 핵심 동력이 될 것입니다 [출처: news.skhynix.com]. 크레셈은 고정밀 광학 기술과 AI 비전 알고리즘을 융합한 차세대 검사 모듈 개발에 역량을 집중함으로써, 기술적 진입장벽을 높이고 글로벌 AI 반도체 공급망 내에서 대체 불가능한 핵심 검사 솔루션 기업으로 도약해야 할 것입니다 [출처: [기업 분석 보고서] (주)크레셈 (CRESSEM): 차세대 반도체 패키징 검사 솔루션의 선두주자].